Geschiedenis van de elektrotechniek in 100 jaartallen

Toegegeven, het is mogelijk honderd andere jaartallen te verzamelen die de geschiedenis van de elektrotechniek net zo goed (of beter) in beeld brengen. Dit is echter mijn persoonlijke keuze, die u hopelijk wat leerzaam leesplezier verschaft, en waarin ik bewust ook wat minder bekende data heb geselecteerd.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 24-04-2025

[1] 2750 v.Chr.: Egyptenaren ontdekken de elektrische schok

Uit ontcijferde hiërogliefen blijkt dat de oude Egyptenaren wisten dat er vissen rondzwemmen die niet alleen door te bijten of te steken pijn kunnen veroorzaken, maar ook op een magische manier op afstand, zonder enige vorm van rechtstreeks contact. Dat zijn ongetwijfeld siddermeervallen zoals de '*Malapterurus Electricus*' die in staat zijn elektrische spanningen tot 350 V te genereren waarmee zij hun prooi kunnen verlammen. De Egyptenaren vonden uiteraard geen verklaring voor dit verschijnsel en noemden deze vissen de '*donder van de Nijl*' en zagen ze als de beschermers van al het leven in de rivier.



De siddermeerval 'Malapterurus Electricus'. (© 2005 Stan Shebs)

[2] 1000 v.Chr.: De Grieken ontdekken het magnetisme

De oude Grieken hebben de oudste bewaard gebleven notities achtergelaten over magnetisme. In de streek Magnesia in Klein-Azië werd een mineraal gevonden, dat vreemdsoortige eigenschappen had. Dit mineraal werd *'magnetiet'* genoemd. Een klomp van dit mineraal was in staat kleine stukjes ijzer aan te trekken. Als uit dit mineraal een staaf werd vervaardigd en deze staaf werd vrij opgehangen aan een touwtje, dan bleek de staaf steeds naar een welbepaalde stand te draaien en in die stand in rust te komen. Magnetiet werd '*richtende steen*' genoemd, omdat men dank zij dit wonderbaarlijke mineraal steeds de richting van het noorden kon opzoeken. Toch schijnen de oude Grieken dit mineraal niet gebruikt te hebben bij hun scheepvaart.

[3] 600 v.Chr.: Thales van Milete ontdekt statische elektriciteit

Thales van Milete (624 v.Chr. - 545 v.Chr.) was een belangrijke presocratische filosoof. Hij had twee uitgangspunten voor zijn filosofische gedachten:

- Conclusies omtrent het universum mogen alleen op het universum zelf worden gebaseerd, goddelijk ingrijpen telt niet als argument.
- Opvattingen moeten aan de hand van argumenten worden gestaafd.

Thales van Milete deed rond 600 voor Christus proefjes, waaruit bleek dat een bepaalde in de natuur voorkomende steen, '*electrum*' genoemd, kleine voorwerpen zoals twijgjes en grassprietjes kon aantrekken als de steen eerst stevig was gewreven. Deze vreemde verschijnselen werden daarom '*electrium*' genoemd en het zal duidelijk zijn dat het hedendaagse woord '*elektriciteit*' hiervan werd afgeleid. Electrum is het oud-Griekse woord voor barnsteen.

[4] 400 v.Chr.: In China ontdekt men dat zeilsteen ijzer aantrekt
Een zeilsteen is een natuurlijke permanente magneet uit varianten van het mineraal magnetiet. Het permanente karakter van een dergelijke natuurlijke magneet ontstaat waarschijnlijk door een heel sterk gepulst magnetisch veld rond een blikseminslag in de aarde. In zeer oude Chinese geschriften van '*De Meester uit het Demonendal*' wordt vermeld dat dit zeilsteen in staat is ijzeren spijkers uit schoeisel aan te trekken. Uit deze tijd stammen ook de eerste Chinese kompaslepels (lees verder).

[5] 1187: Alexander Neckham beschrijft een primitief kompas
Alexander Neckam (1157 - 1217) was een Engelse dichter, theoloog en schrijver. Zoals zovelen van zijn theologische tijdgenoten was ook hij zeer geïnteresseerd in de natuurlijke historie. In zijn boeken '*De utensilibus*' en '*De naturis rerum*' geeft Alexander Neckam de vroegste Europese beschrijvingen van een primitief kompas als gids voor zeelieden. Naar wordt beweerd was hij in Parijs toen hij vernam dat een schip aan de kade lag dat een '*gemagnetiseerde Chinese lepel*' aan boord had. Deze permanent magnetisch gemaakte lepel was zo gebogen dat hij in evenwicht bleef liggen en slechts met een heel klein oppervlak contact maakte met de harde ondergrond. Dat klein oppervlak vormde een vrijwel wrijvingsloos draaipunt. De lepel zou draaien totdat hij naar het noorden wees en zou zo het schip leiden bij somber weer of op sterrenloze nachten. Het ontwerp van dit primitieve kompas werd toegeschreven aan oeroude Chinese wetenschappers, vandaar de naam.



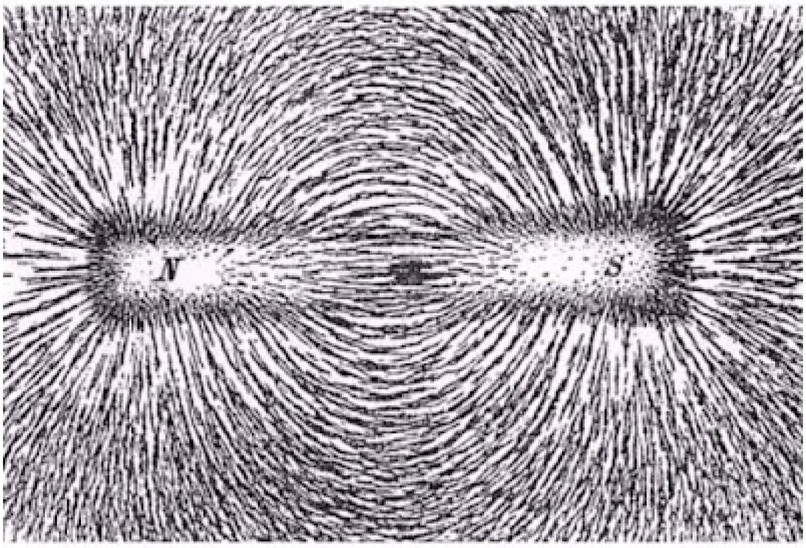
Een gemagnetiseerde Chinese lepel als eerste kompas.
(© https://sonofchina.com)

[6] 1269: Petrus Peregrinus experimenteert met magnetische stenen
Petrus Peregrinus was een unieke wetenschapper die, dwars tegen de mores van zijn tijdgenoten in, het experimenteel onderzoek heel erg waardeerde. Daarnaast zocht hij de dialoog met handwerklieden, die veel praktische kennis bezaten over de wetenschap.

Hij publiceerde het boek '*Epistola de Magnete'* waarin hij een serie experimenten met betrekking tot magnetisme beschreef. Een eeuw nadat het kompas in Europa was geïntroduceerd, werd dank zij zijn experimenten duidelijk dat het kompas-verschijnsel werkte op basis van het magnetisme. Hij geloofde echter dat kompassen wezen naar de '*Hemelse pool*'. In de middeleeuwse astronomie speelde het idee van de hemelse pool een belangrijke rol. Men dacht dat de hemel een bolvormige koepel was waarin de sterren vastgezet waren. De hemelse pool was als draaipunt de referentie waar de gehele schijnbare beweging van de sterren omheen was georganiseerd

[7] 1550: Girolamo Cardano onderscheidt elektrische en magnetische krachten
Girolamo Cardano (1501 - 1576) was een Italiaans arts en hoogleraar aan de Universiteiten van Pavia en Bologna. Hij beoefende de wiskunde en schreef over filosofie, astrologie, natuurkunde en het recht.
Hij maakte in zijn boek '*De Subtilitate*' een belangrijk onderscheid tussen de twee onzichtbare natuurkrachten elektriciteit en magnetisme op basis van hun gedrag en oorsprong. Cardano meende dat magnetisme een eigenschap was die inherent was aan bepaalde materialen die zowel aantrekking als afstoting konden vertonen. Dit type kracht zat in het materiaal zelf, met als logisch gevolg dat een magneet altijd op dezelfde manier werkte en dat de eigenschappen stabiel waren over tijd.
Aan de andere kant beschreef hij de krachten die ontstonden bij bijvoorbeeld het wrijven over barnsteen. Hij merkte op dat dit fenomeen, statische elektriciteit, anders werkte dan magnetisme. Deze kracht werkte slechts tijdelijk en vertoonde andere effecten dan de aantrekking en afstoting die hij bij magnetische materialen zag.
Cardano legde met dit onderscheid de basis voor het verder begrip en de uiteindelijke scheiding van de natuurkrachten in de wetenschappelijke wereld.

[8] 1600: William Gilbert legt een verband tussen elektriciteit en magnetisme
William Gilbert (1544 - 1603) wordt algemeen geëerd als de grondlegger van het idee dat magnetisme en elektriciteit heel veel met elkaar te maken hebben. In zijn baanbrekende werk '*De Magnete*' onderzocht hij zowel magnetische als elektrische verschijnselen en wees hij op opmerkelijke overeenkomsten. Hij voerde zorgvuldig gecontroleerde experimenten uit met natuurlijke magneten en met voorwerpen die elektrische eigenschappen vertoonden. Gilbert merkte op dat zowel magnetische als elektrische krachten eigenschappen vertoonden als aantrekken en afstoten. Hoewel hij de krachten toen nog niet als exact hetzelfde beschouwde, legde hij de basis voor de idee dat er mogelijk een onderliggend verband bestaat in hoe deze krachten werken. Zo observeerde hij dat de intensiteit van beide krachten afneemt met de afstand en dat ze in een bepaalde richting werkten.
Verder ontdekte hij, door ijzervijlsel rond een staaf magnetiet te strooien, het magnetisch veld. Hij ontdekte dat gemagnetiseerde naalden zich richten volgens dat magnetisch veld. Gilbert noemde dit verschijnsel echter '*de aura*', een diepzinnig Goddelijk verschijnsel dat zich rond het magnetiet bevond en zich in alle richtingen uitspreidde. Een van zijn revolutionaire ideeën was dat de aarde zelf een grote magneet zou kunnen zijn.
Gilbert was nog niet in staat de theoretische basis van elektriciteit en magnetisme te begrijpen. Echter, zijn nauwkeurige experimentele methodiek en zijn beschrijving van de eigenschappen van beide verschijnselen zorgde ervoor dat latere wetenschappers, zoals Coulomb, Faraday en Maxwell, verder konden bouwen op zijn inzichten om het verband tussen elektriciteit en magnetisme te verklaren.



De ontdekking van het magnetisch veld.
(© 1913 Newton Henry Black)

[9] 1629: Niccolò Cabeo beschrijft elektrische aantrekking en afstoting

Niccolò Cabeo (1586 - 1650) was een Italiaanse wiskundige die een omschrijving formuleerde van wat wij nu kennen als elektrische aantrekking en afstoting. Cabeo dacht dat een elektrisch geladen voorwerp een soort immateriële substantie, '*effluvia*' genaamd, uitstraalde. Volgens zijn redenering was deze effluvia in staat om het omliggende medium te beïnvloeden en een druk of kracht uit te oefenen op nabije objecten. Wanneer twee geladen lichamen elkaar naderden, zorgde de interactie van hun uitgestoten effluvia's voor een afstotende werking, waardoor de lichamen van elkaar weg bewogen. Ook hij zag bovendien de analogie met magnetische verschijnselen.
Zijn historisch belang is dat hij voor het eerst het idee van immateriële elektrische en magnetische velden die op afstand werken aan de orde durfde te stellen. Zijn effluvia kan immers worden beschouwd als de beschrijving voor wat later het elektrisch veld zou gaan heten.

[10] 1650: Otto von Guericke vindt de elektriseermachine uit

Otto von Guericke (1602 - 1686) vond de elektriseermachine uit door zijn waarneming dat wrijving tussen bepaalde materialen een elektrische lading kon opwekken. Hij gebruikte bij zijn experimenten met wrijvingselektriciteit een bolvormig object, gemaakt van zwavel. Dit chemisch element is namelijk zeer gevoelig voor het opwekken van statische elektriciteit door wrijving, een gevolg van het '*tribo-elektrisch effect*'. Hij liet de zwavelbol ronddraaien terwijl hij tegen een ander materiaal, vaak leer of stof, aanwreef. Nadat de bol voldoende lading had opgebouwd, toonde hij de effecten van statische elektriciteit aan. De geladen bol was in staat om lichte objecten, zoals kleine stukjes papier of stofdeeltjes, aan te trekken of te laten bewegen. Zijn machine vormde de basis voor latere veel betere en grotere elektriseermachines.



De elektriseermachine van Otto von Guericke.
(© hydroelectricite.ca)

[11] 1729: Stephen Gray ontdekt dat materialen geleidende eigenschappen hebben
Stephen Gray (1666 - 1736) gebruikte een voorwerp dat door wrijving statisch was opgeladen en verbond dit met een ander, aanvankelijk neutraal voorwerp via een draad of touwtje. Hij probeerde zo de overdracht van de elektrische lading te volgen. Hij experimenteerde met verschillende soorten draden en ontdekte dat niet alle materialen hetzelfde gedrag vertonen. Bij gebruik van sommige materialen verplaatste de lading zich van het ene naar het andere voorwerp. Bij andere materialen verplaatste de lading zich nauwelijks of helemaal niet.
Gray merkte bovendien dat de geleidende eigenschappen van een materiaal onder bepaalde omstandigheden konden variëren. Natte draden van zijde geleidden de elektriciteit veel beter dan droge draden.
Stephen Gray leverde dus de basiskennis voor het onderscheid maken tussen geleiders en isolatoren. Deze ontdekking was essentieel voor het latere begrip van elektrische fenomenen en speelde een belangrijke rol in de ontwikkeling van de elektrotechniek.

[12] 1734: Du Fay ontdekt de onzichtbare '*elektrische vloeistof*'
Charles François de Cisternay du Fay (1698 - 1739), ook wel gespeld als Dufay, was een Franse scheikundige en toezichthouder van de koninklijke tuinen van Frankrijk.
In het jaar 1734 ontdekte hij dat een glazen staaf die met een zijden doek was gewreven een tegengestelde kracht uitoefende op een naald dan een harsstaaf die met een dierenvel was gewreven. Bovendien kon hij aantonen dat deze krachten van het ene naar het andere materiaal konden worden overgebracht door ze te verbinden met een koperen draadje. Du Fay verklaarde dit verschijnsel door te veronderstellen dat er een soort onzichtbare '*elektrische vloeistof*' bestond die op de een of andere manier van het ene naar het andere voorwerp kon stromen. Dit is de oorsprong van het begrip '*elektrische stroom*'! Volgens Du Fay bestonden er twee soorten elektrische vloeistof, namelijk '*glasachtige*' en '*harsachtige*'. Door voorwerpen te wrijven met doeken of vellen werden deze '*volgeladen*' met de vloeistof. Du Fay ontdekte experimenteel dat twee voorwerpen die met dezelfde elektrische vloeistof waren volgeladen elkaar afstootten en dat voorwerpen die met verschillende elektrische vloeistof waren volgeladen elkaar aantrokken.
Ook Du Fay vroeg zich af of er verband bestond tussen elektriciteit en magnetisme. Men had in die tijd immers reeds ontdekt dat er ook twee soorten magnetisme bestaan, die elkaar kunnen aantrekken of afstoten.

[13] 1745: Pieter van Musschenbroek vindt de '*leidse fles*' uit

De Nederlander Pieter van Musschenbroek (1692 - 1761) kan geboekstaafd worden als de uitvinder van de condensator. In die tijd werden allerlei pogingen ondernomen om die vreemde elektrische vloeistoffen ergens in te kunnen opslaan. Om een lang verhaal kort te maken volstaat het te vermelden dat van Musschenbroek, een professor aan de universiteit van Leiden, er in 1745 als eerste in slaagde om die vreemde onzichtbare vloeistoffen op te bergen in een fles. Die fles is sindsdien bekend onder de naam '*leidse fles*'. Een leidse fles bestaat, zie de onderstaande figuur, uit een glazen vat dat aan weerszijden voorzien is van een geleidende laag. Men gebruikte in die jaren dunne folies van metalen, die op de glazen wanden van het vat werden gekleefd. Het glazen vat werd gevuld met metaalsnippers en voorzien van een centrale geleider, voorzien van een bolletje.



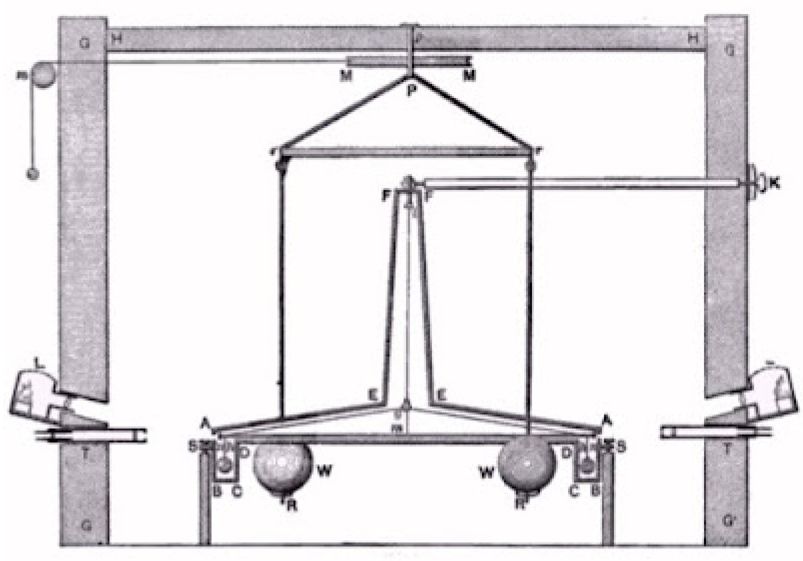
Een batterij van leidse flessen. (© nemosciencemuseum.nl)

Als men de buitenste folie verbond met de aarde en het bolletje van de centrale geleider in aanraking bracht met een volgeladen voorwerp, dan bleek dat de elektrische vloeistof van het voorwerp afvloeide naar de glazen pot en zich daar verzamelde. Bracht men enige keren de elektrische vloeistof van een volgeladen voorwerp over naar de leidse fles en raakte men nadien het bolletje van de centrale geleider aan, dan kreeg men een flinke schok!
In feite was de leidse fles niets anders dan de eerste condensator die werd gemaakt. De twee metalen folies zou men nu de '*elektroden*' van de condensator noemen, de glazen wand van het vat het '*diëlektricum*'.

[14] 1750: John Michell vindt de magnetische torsiebalans uit

In het jaar 1750 probeerde de Engelse theologiestudent John Michell (1724 - 1793) de aantrekkingskracht tussen twee magneten wiskundig te formuleren. Daarvoor ontwierp hij een heel gevoelige zogenaamde magnetische torsiebalans en kwam er achter dat de aantrekkingskracht F omgekeerd evenredig is met het kwadraat van de afstand tussen beide magneten en recht evenredig met de sterkte p_1 en p_2 van de magneten.
In formulevorm:
$F = K_m \cdot [(p_1 \cdot p_2) / s^2]$

De term K_m werd de '*magnetische constante*' genoemd.



De magnetische torsiebalans van John Michell.
(© 1798 Henry Cavendish)

[15] 1752: Benjamin Franklin voert zijn vlieger experiment uit

De Amerikaan Benjamin Franklin (1706 - 1790) was geïntrigeerd door de elektrische experimenten die de Europese wetenschappers verrichtten en begon zelf met experimenteren in 1746. Al snel maakte hij baanbrekende observaties. Zo was hij de eerste, in 1747, die het over positieve en negatieve ladingen had in plaats van '*glasachtige*' en '*harsachtige*' vloeistoffen. Hij dacht dat die lading alleen in één richting kon vloeien, namelijk van een voorwerp met positieve lading naar een voorwerp met negatieve lading.
Ook had Franklin in 1749 al opgemerkt dat elektrische vonken veel overeenkomsten vertoonden met bliksemschichten. Hij was niet de eerste wetenschapper aan wie dit was opgevallen, maar wel de eerste die dit verschijnsel experimenteel wilde onderzoeken. Het beroemde levensgevaarlijke vlieger experiment van Benjamin Franklin was dus bedoeld om aan te tonen dat bliksem een vorm van elektriciteit is. Franklin liet tijdens een onweersbui een vlieger op met een sleutel bevestigd aan de onderzijde van het geleidende zijden vliegertouw. Toen de vlieger in aanraking kwam met de elektrische ladingen in de lucht, vond er een elektrische vonkontlading plaats tussen de sleutel en een leidse fles die in de buurt van de sleutel werd gehouden. De leidse fles werd dus geladen door de elektriciteit die in de lucht aanwezig was. Dit experiment bewees dat bliksem eigenlijk elektriciteit is, wat later leidde tot de uitvinding van de bliksemafleider.
Helaas hebben verschillende wetenschappers, die het experiment wilden herhalen, dit niet overleefd!



Het vlieger experiment van Benjamin Franklin. (© cpwv.org)

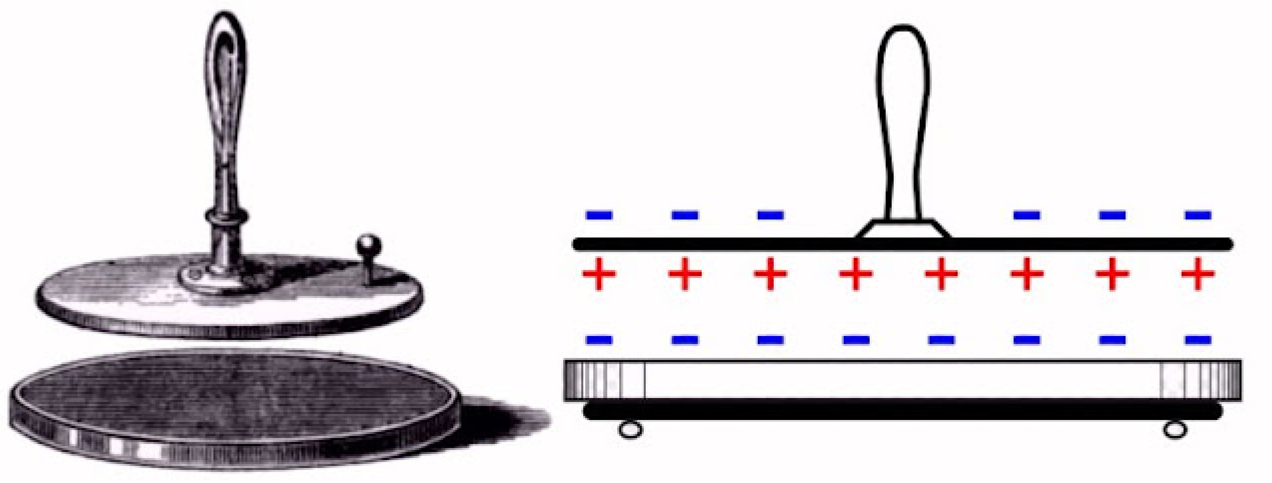
[16] 1759 - Elektriciteit wordt wiskundig beschreven door Franz Aepinus
Franz Aepinus (1724 - 1802), een vooraanstaand natuurkundige en wiskundige uit de 18e eeuw, was een van de eersten die probeerde elektrische verschijnselen in een wiskundig kader te vatten. Zijn werk '*Tentamen Theoriae Electricitatis et Magnetismi*' was de eerste succesvolle poging om deze onderwerpen wiskundig te beredeneren. Hij veronderstelde dat elektrische lading zich kon verspreiden over een lichaam. Hij formuleerde differentiaalvergelijkingen die beschreven hoe die elektrische lading varieerde in de ruimte. In zijn denkbeelden zit al de intuïtie dat elektrische effecten afnemen met toenemende afstand. Hij voelde aan dat de invloed van ladingen kan worden beschreven door een wiskundige wet waarbij de kracht afneemt met het kwadraat van de afstand. Dit is dus een eerste benadering van de latere wet van Coulomb.

[17] 1772 - Henry Cavandish bepaalt de grootte van de elektrische lading
Henry Cavendish (1731 - 1810) was een Brits natuurkundige en scheikundige. Door de gedachten van Franklin waren onzinnige ideeën over elektrische vloeistoffen vervangen door zinnige ideeën over ladingen. Ladingen die elkaar aantrokken, bovendien. Dat voorwerpen op afstand elkaar konden beïnvloeden door aantrekking was niet nieuw. Newton had immers in het jaar 1687 zijn wereldberoemd boek '*Principia*' geschreven, waarin een wiskundige beschrijving werd gegeven van de zwaartekracht (de gravitationele kracht) tussen voorwerpen in de ruimte. Newton bewees dat de gravitatiekracht tussen twee voorwerpen recht evenredig is met hun massa's en omgekeerd evenredig is met het kwadraat van hun onderlinge afstand. Met deze eenvoudige wiskundige wet bleek het mogelijk de bewegingen van alle planeten van ons zonnestelsel zeer nauwkeurig te beschrijven. Bovendien had Michell in 1750 een identieke wet opgesteld voor de kracht die twee magneten op elkaar

uitoefenden. Het lag dus voor de hand dat men op zoek ging naar een soortgelijke wiskundige beschrijving van de elektrische aantrekkingskracht tussen positief en negatief geladen voorwerpen. Dank zij de elektroscoop kon men de grootte van elektrische ladingen meten. In het jaar 1772 deed de Engelsman Henry Cavendish een aantal proeven waaruit bleek dat de aantrekkende kracht tussen een positieve en een negatieve geladen voorwerp recht evenredig is met de grootte van hun ladingen en omgekeerd evenredig is met het kwadraat van de afstand tussen de geladen voorwerpen. Een meer dan toevallige overeenkomst met de formule die Newton vond voor de gravitationele aantrekking tussen voorwerpen en met de wet van Michell!
Helaas verzuimde Cavendish de resultaten van zijn experimenten in een of ander beroemd wetenschappelijk tijdschrift te publiceren. Zijn geschriften werden pas later teruggevonden, lang nadat een andere wetenschapper dezelfde formule experimenteel had aangetoond.

[18] 1775: Alessandro Volta verbetert de '*electrophorus*'

Graaf Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta (1745 - 1827) was een Italiaans natuurkundige. De '*electrophorus*' was een eenvoudig apparaat dat werd gebruikt om statische elektriciteit op te wekken voor experimenten. Het apparaat werd voor het eerst beschreven in de tweede helft van de 18e eeuw. Hoewel niet duidelijk is wie de electrophorus uitvond is men het er wél over eens dat Alessandro Volta het apparaat verbeterde tot het in de dagelijkse laboratorium praktijk bruikbaar was.
De electrophorus werkte op basis van inductie en de eigenschappen van isolatoren. Het apparaat bestond uit twee ronde onderdelen. Een isolerend plaatje werd eerst bedekt met statische elektriciteit door wrijving of een andere methode. Materialen zoals resin of rubber werden vaak gebruikt omdat zij goed isoleren. Een geleidend metalen plaatje werd bovenop het geladen isolerende plaatje geplaatst. Wanneer het geleidend plaatje in contact kwam met de geladen isolator, induceerde de statische lading een scheiding van ladingsdragers in het metaal. Hierdoor ontstond aan de onderkant van het metaal een netto lading die positief of negatief was, afhankelijk van de gebruikte materialen.
Nadat het geleidend plaatje voorzichtig werd verwijderd, behield het zijn lading die vervolgens gebruikt kon worden voor verdere experimenten of demonstraties.

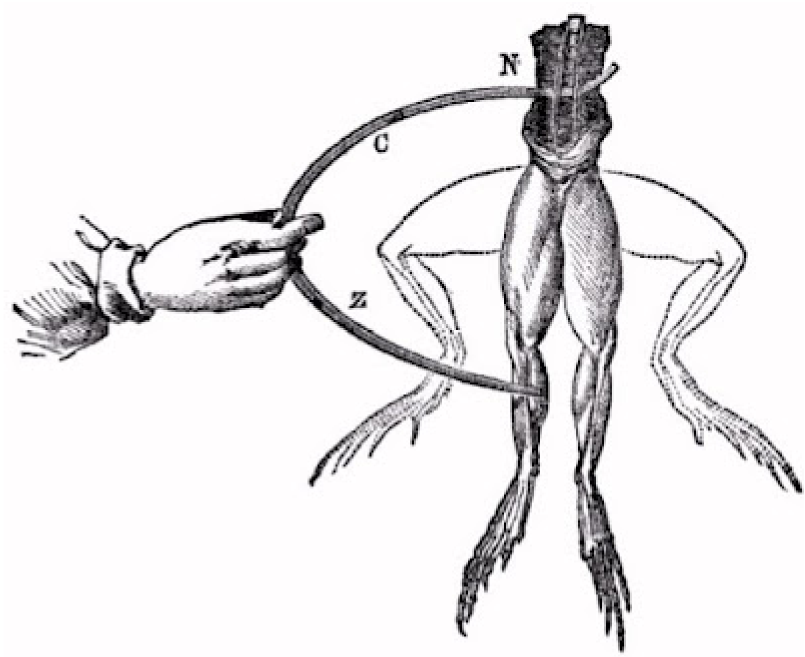


De verbeterde 'electrophorus' van Alessandro Volta. (© 1840 Robert Hare)

[19] 1780: Luigi Galvani ontdekt de galvanische reactie

Luigi Galvani (1737 - 1798) was een Italiaanse arts en natuuronderzoeker die een opmerkelijke ontdekking deed die de basis legde voor ons begrip van elektrische verschijnselen in biologische organismen. In de jaren 1780 voerde Galvani experimenten uit waarin hij de spieren en zenuwen van kikkers onderzocht. Hij ontdekte dat wanneer hij zilveren en koperen naalden in contact bracht met de zenuwen van een kikker, de achterpoten van de kikker spontaan gingen bewegen. Galvani interpreteerde dit als bewijs dat er een soort '*dierlijke elektriciteit*' in het weefsel van dieren aanwezig was. Hij meende dat deze elektrische kracht inherent was aan levende weefsels en dat deze door externe stimulatie kon worden opgewekt.

Galvani's experimenten vestigden de aandacht op het feit dat elektriciteit niet alleen in mechanische systemen of als statische kracht bestond, maar ook een rol speelde in de fysiologie van levende wezens.



Het kikker experiment van Luigi Galvani.
(© 2014 David Ames Wells)

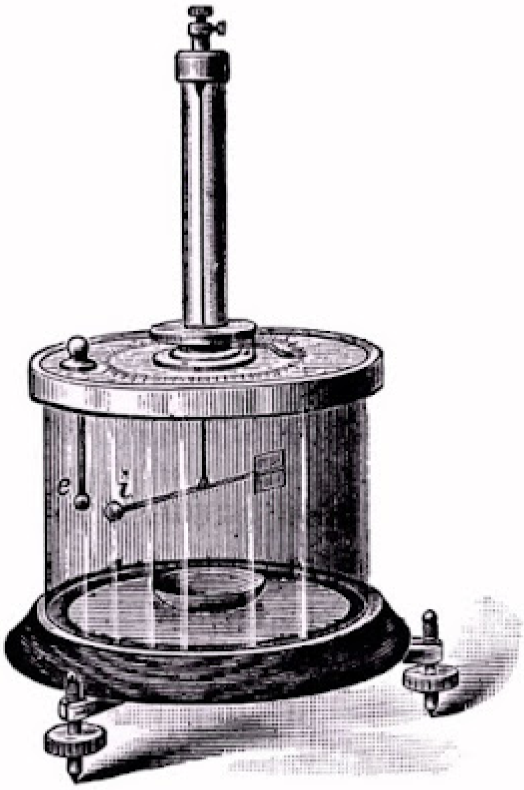
[20] 1787: Abraham Bennet maakt de eerste goed bruikbare elektroscoop
De moderne elektroscoop, een instrument dat door middel van bewegende goudblaadjes de aanwezigheid van elektrische lading aantoont, werd in 1787 ontwikkeld door de Engelse natuurkundige Abraham Bennet (1749 - 1799). De elektroscoop zit in een glazen behuizing en bestaat uit een stevige metalen staaf met een metalen knop die door een isolerend deksel in de behuizing steekt. Aan het andere uiteinde van de staaf zijn twee dunne blaadjes bladgoud bevestigd. Een elektrisch geladen voorwerp (positief of negatief) wordt dicht bij de knop bovenop de elektroscoop gebracht. Door inductie of contact kan de lading zich verplaatsen naar de metalen staaf en de goudblaadjes. De goudblaadjes nemen dezelfde lading aan en aangezien gelijke ladingen elkaar afstoten, zullen de blaadjes uit elkaar worden getrokken. Hoe verder de blaadjes uit elkaar gaan, hoe groter de hoeveelheid elektrische lading. Als het voorwerp wordt weggehaald of de elektroscoop wordt ontladen vallen de blaadjes weer terug naar hun uitgangspositie.



De elektroscoop van Abraham Bennet.
(© percorsielettrici.it)

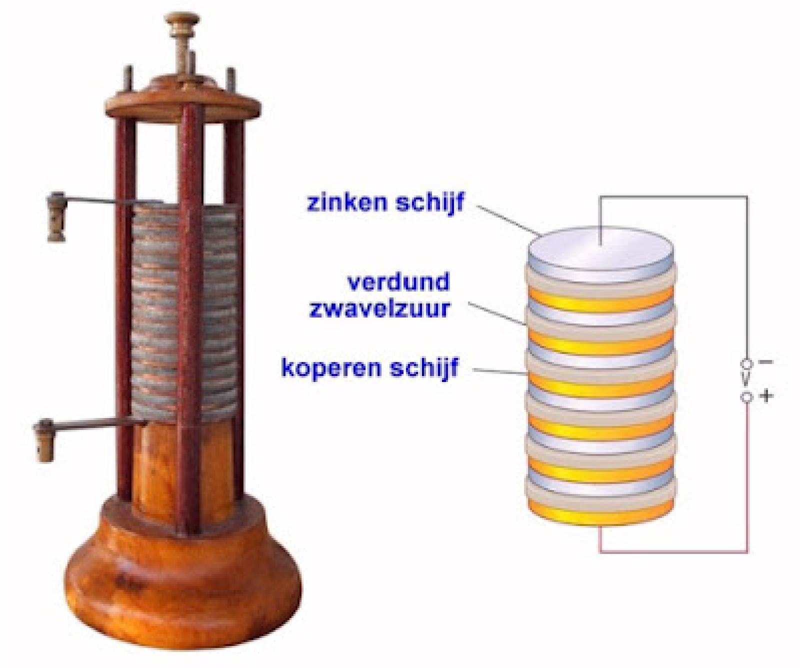
[21] 1788: Charles-Augustin de Coulomb stelt zijn beroemde wet op

Charles-Augustin de Coulomb (1736 - 1806) was een Franse natuurkundige die zich bezighield met elektriciteit en magnetisme. Het is volgens de officiële geschiedschrijving Coulomb die in het jaar 1788 met zijn beroemde '*wet van Coulomb'* de eer kon opeisen om de elektrische aantrekking tussen geladen voorwerpen volledig wiskundig beschreven te hebben. Coulomb gebruikte voor zijn experimenten een heel ingenieus apparaat, getekend in de onderstaande figuur. Met deze '*elektrostatische torsiebalans*' kon de kracht worden bepaald die twee even grote elektrisch opgeladen bolletjes in het luchtledige op elkaar uitoefenden. Het volstond de hoek te meten waarover de balans draaide om voor iedere afstand tussen de bollen een maat voor de kracht te berekenen.
Met dit apparaat ontdekte Coulomb hetzelfde als wat Cavendish zestien jaar eerder had ontdekt. De wiskundige wet die de aantrekkingskracht tussen twee elektrisch geladen voorwerpen definieert en bekend staat als de eerste wet van Coulomb luidt:
$F = K_e \cdot [(q_1 \cdot q_2) / s^2]$
In normale taal: de kracht F die twee elektrisch geladen voorwerpen op elkaar uitoefenen is gelijk aan het product van hun ladingen q_1 en q_2, gedeeld door het kwadraat van hun onderlinge afstand s en vermenigvuldigd met een bepaalde constante factor K_e. Die constante werd de '*elektrische constante*' genoemd en nu is bekend dat deze constante, net als K_m (de magnetische constante) een van de zogenoemde '*natuurconstanten*' is. Dertien getallen voor constante factoren die in natuurkundige formules voorkomen en die in wezen er voor zorgen dat het heelal is zoals het is.



De elektrostatische torsiebalans van Coulomb.
(© Patrick Guenette)

[22] 1800: Alessandro Volta maakt zijn 'v*oltaische cel*'
De Italiaan Alessandro Volta (1745 - 1827) werd geïntrigeerd door de experimenten van Galvani, maar concludeerde dat er geen sprake kon zijn van een andere soort elektriciteit. Hij dacht dat de samentrekkingen van de spieren van de kikker iets te maken had met het feit dat elektriciteit kon opgewekt worden als men geleiders van verschillende samenstelling in een vochtige omgeving aanbracht. Deze (juiste) conclusie voerde hem tot de uitvinding van het allereerste elektrische batterij, die 'v*oltaische cel*' werd genoemd.
De cel bestond uit een koperen en een zinken ronde plaat, waartussen een in verdund zwavelzuur gedompelde doek was aangebracht. Met dit element kon men gedurende een kleine tijd een elektrische lading laten vloeien van de ene naar de andere plaat. Volta ontdekte bovendien dat men een aantal voltaische cellen in serie kon schakelen om meer elektriciteit op te wekken. Een dergelijke serieschakeling staat bekend als de '*zuil van Volta*'.



Een zuil van Volta. (© ApicsItalianCulture)

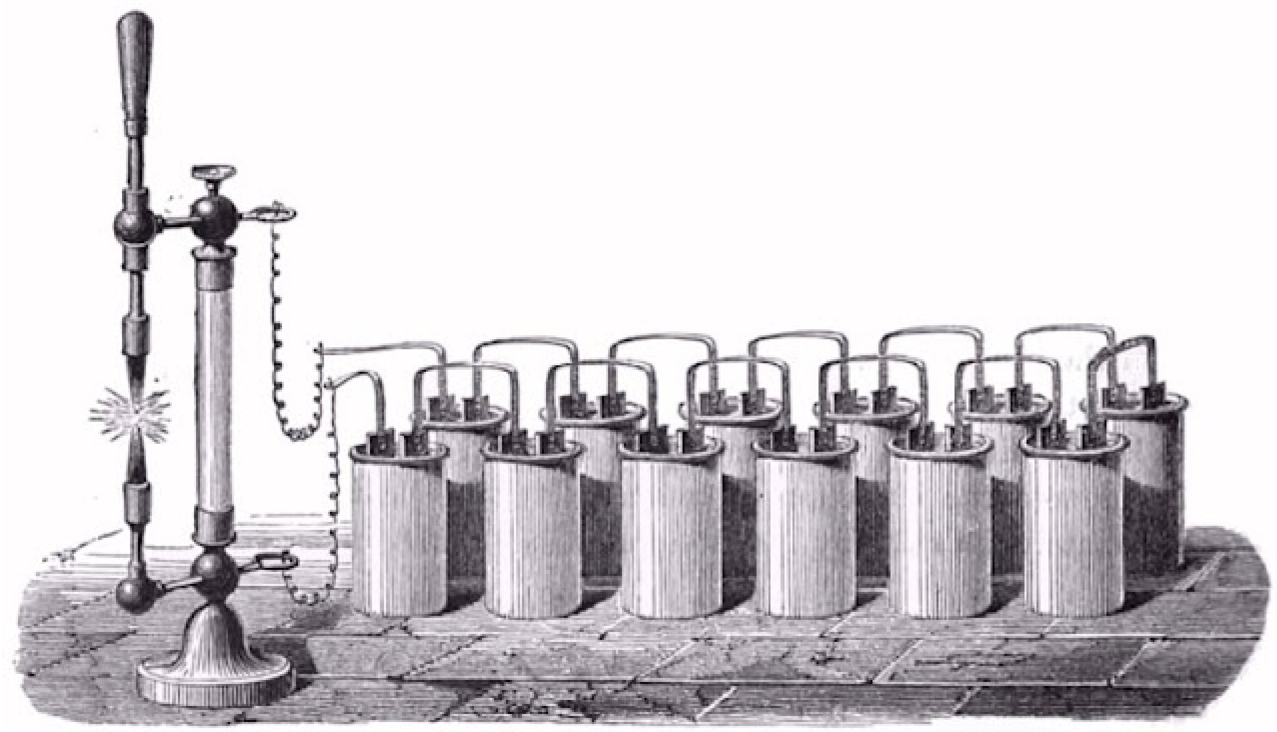
Volta was ook de eerste wetenschapper die het vloeien van elektriciteit door een elektrische geleider consequent aanduidde met het begrip '*elektrische stroom*'. Het verschil in lading tussen twee punten werd door hem '*het potentiaal*' genoemd en dit was een maat voor de grootte van de elektriciteit. Als eerbewijs voor deze definitie van de grootte van elektrische spanning werd haar eenheid later de volt genoemd.

[23] 1801: Humphry Davy ontdekt het fenomeen van de elektrolyse

Sir Humphry Davy (1778 - 1829) was een Brits scheikundige. Naast zijn vele scheikundige ontdekkingen is hij ook bekend als de uitvinder van de naar hem vernoemde mijnlamp. Humphry Davy gebruikte een volta-zuil om zouten in hun elementen te scheiden door middel van wat nu bekend staat als elektrolyse. Met een groot aantal batterijen in serie geschakeld was hij in staat om de metalen kalium en natrium vrij te maken. Het jaar daarop volgden calcium, strontium, barium en magnesium. Zijn werk leidde bij hem tot de conclusie dat de elementen in scheikundige verbindingen niet door newtoniaanse krachten bijeen werden gehouden, maar door elektrische krachten. Davy bestudeerde ook de energie die benodigd was voor het vrijmaken van elementen uit deze zouten, iets dat nu bekend staat onder de naam elektrochemie.

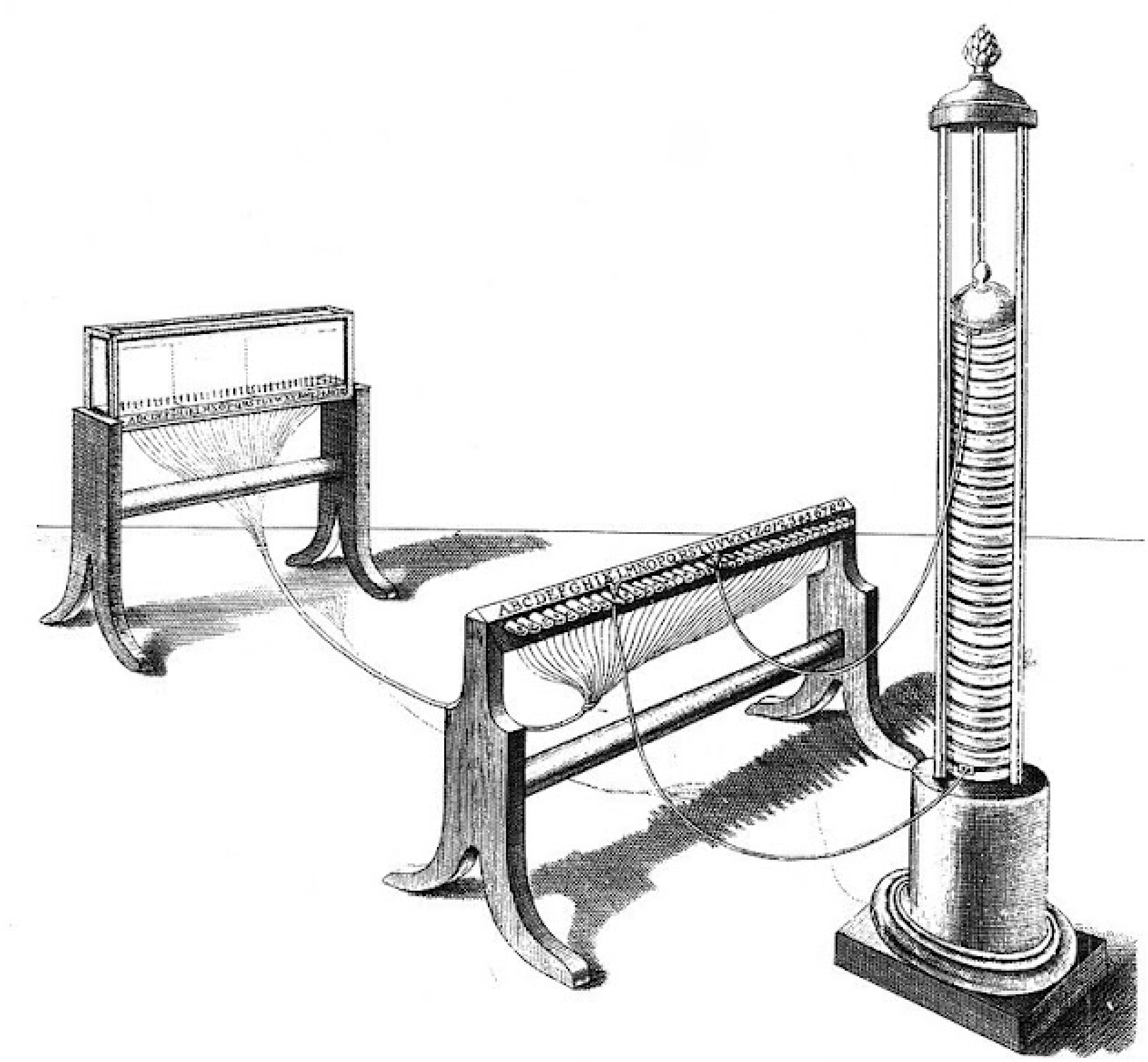
[24] 1802: Humphry Davy vindt de koolstof booglamp uit

Humphry Davy vond een jaar later de koolstof booglamp uit door zijn experimenten met elektriciteit en de eigenschappen van koolstof elektroden. Davy experimenteerde met grote volta-zuilen en ontdekte dat wanneer een hoge elektrische stroom door twee geleiders, omgeven door gas of vloeistof, werd gestuurd er een lichtverschijnsel kon ontstaan. Dit verschijnsel werd de '*elektrische boog*' genoemd.
Davy gebruikte twee gepunte koolstofstaven als elektroden in zijn opstellingen. Wanneer een sterke elektrische stroom door deze elektroden werd gestuurd en deze nadien iets van elkaar werden verwijderd ontstond er een intense lichtboog tussen de twee punten. Het licht was zo intens dat het als straatverlichting kon worden gebruikt.
Deze experimenten van Humphry Davy op het gebied van elektrische boogverlichting waren revolutionair. Ze hadden niet alleen praktische toepassingen, maar gaven inzicht in de onderliggende fysische en chemische processen, zoals de ionisatie van gassen en de eigenschappen van elektrische bogen.



De booglamp van Humphry Davy. (© 1873 Augustin Privat Deschanel)

[25] 1809: Samuel Thomas von Sömmerring construeert de elektrochemische telegraaf
Samuel Thomas von Sömmerring (1755 - 1830) was een Duitse arts, anatoom, antropoloog, paleontoloog en uitvinder. Als uitvinder is hij bekend gebleven dankzij zijn *'elektrochemische telegraaf'*. Dat was de eerste poging om via elektriciteit berichten over te brengen van punt A naar punt B.
De idee achter de elektrochemische telegraaf was het omzetten van een elektrische puls in een chemische reactie die door een verandering in het uiterlijk van een elektrolyt zichtbaar werd. In de onderstaande figuur is het apparaat voorgesteld. De opstelling wordt gevoed door een grote volta-zuil (rechts). Tussen de zender (midden) en de ontvanger (links) loopt een groot aantal van elkaar geïsoleerde elektrische geleiders, iets dat wij nu een kabelboom zouden noemen. In de zender zijn die geleiders verbonden met koperen toetsen die alle letters van het alfabet en de cijfers voorstellen. In de ontvanger eindigen alle geleiders in naalden in een glazen vat dat gevuld is met een elektroliet. Als de twee draden van de volta-zuil in de zender worden verbonden met twee toetsen zullen in de ontvanger aan de corresponderende naalden gasbelletjes ontstaan. Op deze manier weet de ontvanger welke twee letters werden verzonden door de zender.



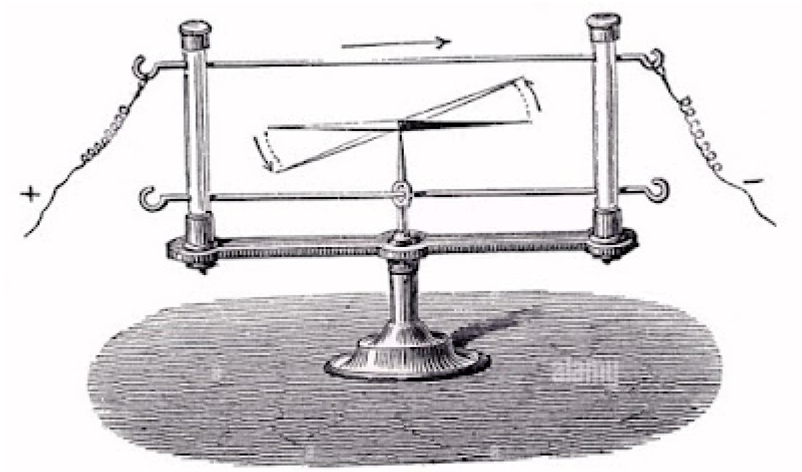
De elektrochemische telegraaf van Samuel Thomas von Sömmerring.
(© 1809 Christian Koeck)

[26] 1811: Siméon-Denis Poisson toont aan dat elektriciteit wiskundige formules volgt
Siméon-Denis Poisson (1781 - 1840) was een van de pioniers die het verband aantoonden tussen de natuurverschijnselen en wiskundige formules. Hij realiseerde zich dat veel natuurverschijnselen, zoals de verspreiding van elektrische ladingen en de variaties in het

elektrische potentiaal, uitsluitend beschreven konden worden onder de vorm van differentiaal vergelijkingen. Een van de beroemdste vergelijkingen die hij opstelde was de '*poisson-vergelijking*'. Deze geeft de fundamentele relatie tussen het elektrische potentiaal en de lokale elektrische lading. Poisson toonde met deze vergelijking aan dat als bekend is hoe de elektrische ladingen in een gebied verdeeld zijn, het met behulp van wiskunde mogelijk is de resulterende potentiaal in dat gebied te berekenen. Het gedrag van elektrische grootheden was dus niet willekeurig, maar voldeed aan zeer strenge en ondubbelzinnige wiskundige wetten. Poisson legde met zijn werk de grondslag voor de latere elektromagnetische theorieën van Laplace als Maxwell.

[27] 1820: Hans Christian Ørsted ontdekt het magnetische effect van elektrische stroom

Hans Christian Ørsted (1777 - 1851) was een Deense natuurkundige en scheikundige. Hij ontdekte in 1820 dat een magneetnaald afweek van de rustpositie als er in de buurt van de naald een stroomvoerende geleider werd aangebracht. Blijkbaar moest er dus rond een stroomvoerende geleider een magnetisch veld ontstaan! Ørsted kon dit experimenteel bevestigen door een stroomvoerende geleider lusvormig in een stuk karton aan te brengen en fijn ijzervijlsel op het karton te strooien. Het ijzervijlsel richtte zich volgens de uit het magnetisme bekende magnetische veldlijnen. De naam Ørsted leeft voort als eenheid van de magnetische veldsterkte.



De proef van Ørsted. (© 1886 World History Archive)

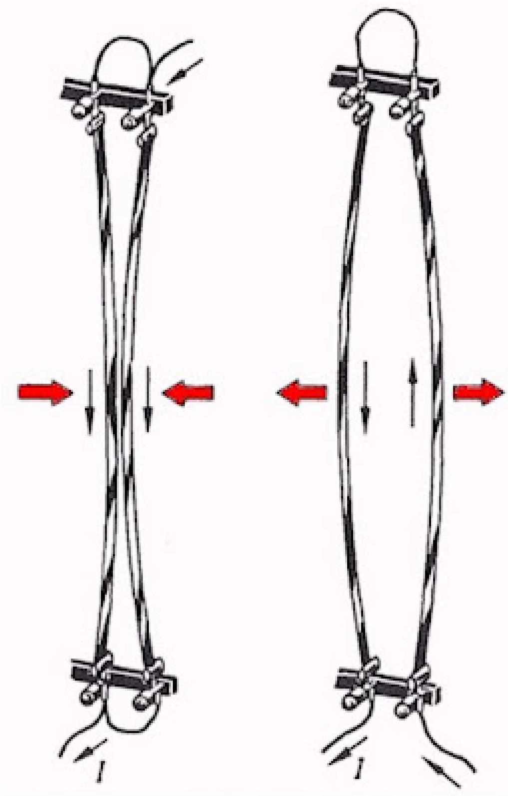
[28] 1820 - André-Marie Ampère ontwerpt de '*galvanometer*'

De Franse wis- en natuurkundige André-Marie Ampère (1775 - 1836) heeft erg veel bijgedragen aan de ontwikkeling van de theorieën over magnetisme en elektriciteit. Hij was niet alleen een geniaal wiskundige, maar ook een handige experimentator die heel wat fundamentele experimenten uitvoerde. Hij zette de experimenten van Ørsted verder en ontwierp de '*galvanometer*', voorgesteld in de onderstaande figuur. Een galvanometer bestaat uit een basisplaat, waarop een kompasnaald wordt bevestigd. Rond het kompas is een grote cilinder aangebracht, waarop vele windingen koperdraad worden gewikkeld. In rust richt de kompasnaald zich naar het magnetisch veld van de aarde. Voert men echter een stroom door de spoel, dan zal het aardveld plaatselijk verstoord worden door het magnetisch veld dat rond de stroomvoerende geleiders ontstaat. De kompasnaald gaat naar een andere stand verdraaien en de draaihoek is een maat voor de grootte van de stroom. Met deze galvanometer kon Ampère zeer zwakke stromen detecteren en hun waarde vergelijken.
Er zijn nadien divers soorten galvanometers ontwikkeld die nu nog steeds worden gebruikt. De originele van Ampère wordt 't*angent galvanometer*' genoemd.



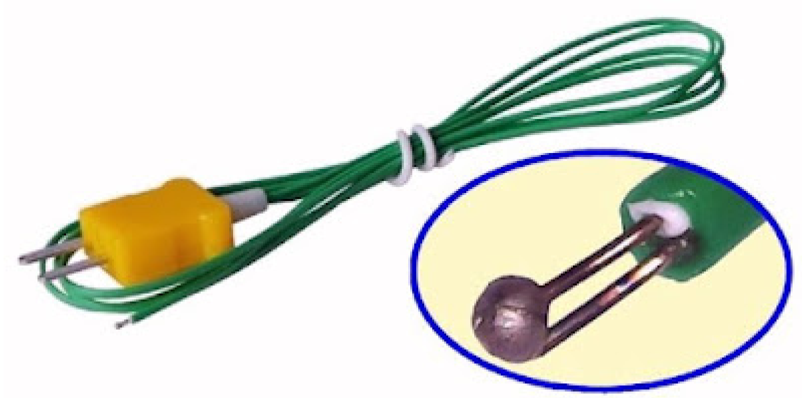
De 'tangent galvanometer' van Ampère.
(© 1910 Central Scientific Company)

Hij onderzocht de verschijnselen die ontstaan als men stromen laat vloeien door twee evenwijdig opgestelde draden. Als de twee draden doorlopen worden door stromen die in dezelfde richting vloeien, trekken de draden elkaar aan. Draait men in één draad de stroomrichting om, dat stoten de draden elkaar af. Ampère was in staat de krachten vrij nauwkeurig te meten en enige wetmatigheden rond dit verschijnsel wiskundig te definiëren. Hij beschreef zijn theorieën in een boek, '*Précis de la Théorie Des Phénomènes Électro-Dynamiques*' genoemd, waarin werd geponeerd dat magnetisme een kracht is die ontstaat tussen elektrische stromen. Hiermee werd voor het eerst een ondubbelzinnige koppeling gelegd tussen de natuurverschijnselen elektriciteit en magnetisme. Een koppeling die uiteindelijk zou voeren tot het opstellen van de elektromagnetische veldtheorie door Maxwell.



De stroomproeven van Ampère. (© elektrikmen.com)

[29] 1821: Thomas Johann Seebeck ontdekt het '*seebeck-effect*'
Thomas Johann Seebeck (1770 - 1831) was een Baltisch-Duitse natuurkundige die in 1821 het naar hem genoemde '*seebeck-effect*' of thermo-elektrisch effect beschreef. Seebeck ontdekte dat als hij twee verschillende metalen in één punt star met elkaar verbond en dat punt opnam in een gesloten circuit er een zeer kleine spanning over dat punt ontstond als dit punt werd verwarmd. Bovendien bleek dat deze spanning afhankelijk was van het temperatuurverschil tussen de temperatuur van het punt en de temperatuur van de omgeving. Het seebeck-effect vormt de basis van de werking van thermokoppels, onderdelen die veel worden gebruikt voor temperatuurmetingen in diverse toepassingen. Door twee verschillende materialen in een gesloten systeem star te koppelen kan men met hoge nauwkeurigheid een temperatuur bepalen, aangezien de gegenereerde spanning een directe functie is van het temperatuurverschil.

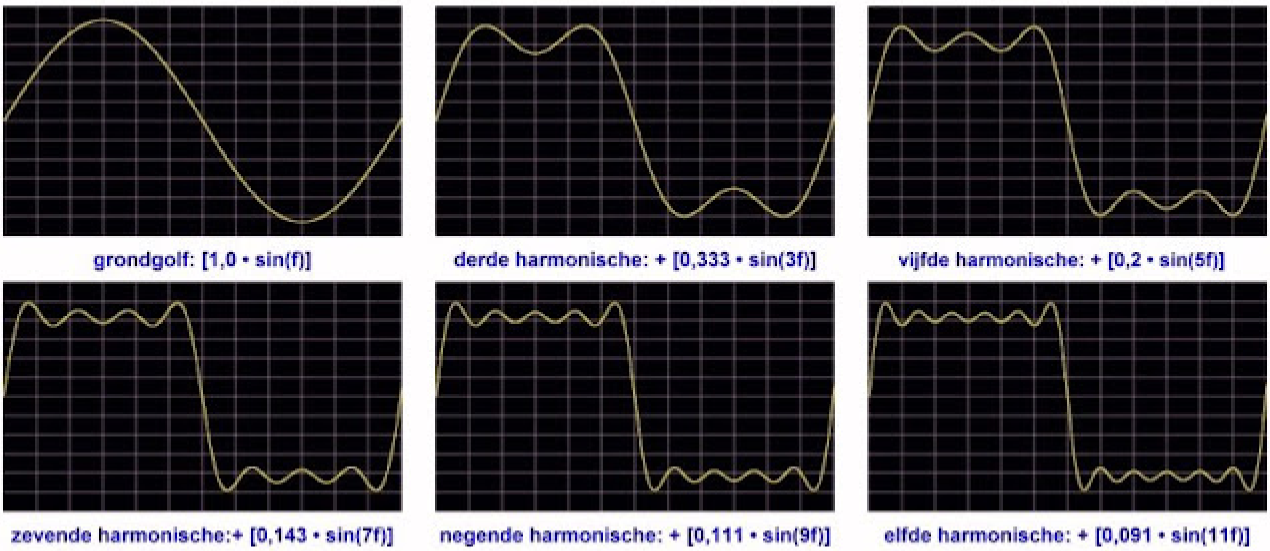


Een thermokoppel met, vergroot weergegeven, de starre koppeling tussen beide metalen. (© 2023 Jos Verstraten)

[30] 1822: Jean-Baptiste Joseph Fourier ontwikkelt de '*fourier-reeks*'
Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768 - 1830) was een Franse wis- en natuurkundige. Hij is vooral bekend geworden door de '*fourier-reeks*', die naar hem is genoemd. Dat is een wiskundige theorie, die niet zo gemakkelijk zonder gebruik te maken van ingewikkelde wiskunde is uit te leggen. Laten wij tóch een poging wagen. Als u naar een muziektoon van een bepaalde frequentie luistert door bijvoorbeeld een snaar van een viool te laten trillen, dan

valt het onmiddellijk op dat die toon heel anders klinkt als hij op een ander instrument wordt gespeeld. Hoe kan dat? Het blijkt dat die toon niet alleen wordt geproduceerd door snaartrillingen op de basisfrequentie, maar dat de klankkleur voornamelijk wordt bepaald door de aanwezigheid van de zogenaamde boventonen. Dat zijn trillingen die frequenties hebben die een veelvoud zijn van de frequentie van de grondtoon. Deze trillingen worden de '*harmonischen*' genoemd. De verhoudingen tussen het volume van de basisfrequentie en het volume van de harmonischen is er verantwoordelijk voor hoe een toon van een bepaald instrument klinkt. U zou deze volumeverhouding als het ware het DNA-profiel van het instrument kunnen noemen.
Fourier bewees, op een wiskundig heel ingewikkelde manier, dat ieder periodiek signaal is samengesteld uit een sinusvormig of cosinusvormig signaal met een basisfrequentie en een heleboel van die harmonischen. En net zoals die samenstelling de toon van een muziekinstrument bepaalt, bepaalt die samenstelling ook de vorm van het periodiek signaal. Die onderlinge verhouding tussen de groottes van de basisfrequentie en de harmonischen wordt de '*fourier-reeks*' van het signaal genoemd.
Men kan bijvoorbeeld berekenen dat de fourier-reeks van een blokgolf uit de onderstaande termen bestaat:

- Eerste harmonische: [1,0 • sin(f)]
- Derde harmonische: [0,333 • sin(3f)]
- Vijfde harmonische: [0,2 • sin(5f)]
- Zevende harmonische: [0,143 • sin(7f)]
- Negende harmonische: [0,111 • sin(9f)]
- Elfde harmonische: [0,091 • sin(11f)]



Samenstelling van een blokgolf uit steeds meer harmonischen. (© 2021 Jos Verstraten)

[31] 1826: Georg Simon Ohm publiceert zijn beroemde wet

Georg Simon Ohm (1789 - 1854) was een Duits wis- en natuurkundige. In 1826 beschreef hij in zijn beroemd geworden boek '*Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet*' de samenhang tussen gelijkstroom, gelijkspanning en weerstand en stelde zijn beroemde '*wet van ohm*' op, die in praktische vorm bekend staat als:
U = I • R
Ofwel: de spanning U over een weerstand R is recht evenredig met de waarde van de weerstand en met de grootte van de stroom I die door de weerstand vloeit.

[32] 1830: Henry ontdekt dat een wisselend magnetisch veld een spanning opwekt

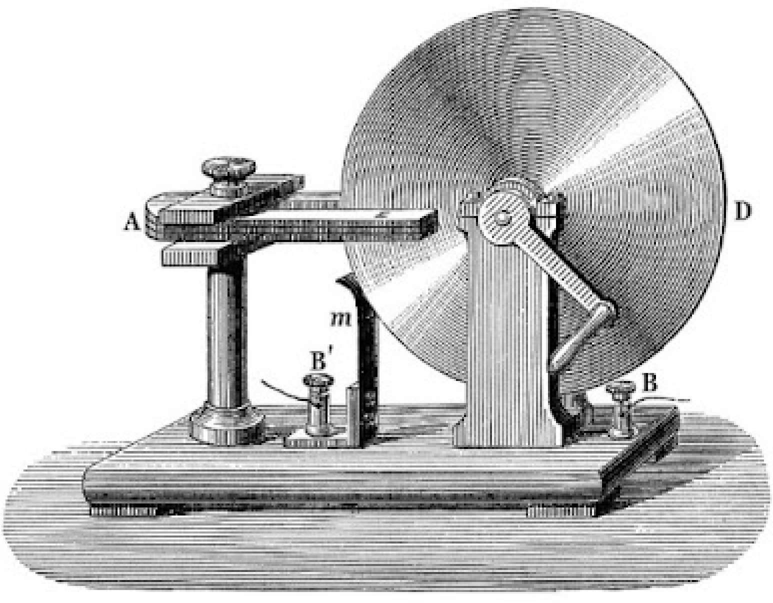
Joseph Henry (1797 - 1878) was een Amerikaans natuurkundige en uitvinder van het relais. In zijn boek '*Contributions to electricity and magnetism*' beschreef hij ongeveer gelijktijdig met Faraday de inductiewet. De SI-eenheid voor zelfinductie, de Henry (H), is naar hem vernoemd.

[33] 1831: Michael Faraday formuleert zijn '*inductiewet*'

Michael Faraday (1791 -1867) was een Brits natuur- en scheikundige. Hij ging verder op de weg die door Ørsted en Ampère werd bewandeld en ontdekte in 1831 het principe van de inductie. Als men twee draden parallel opstelt en door één draad een variërende stroom stuurt, dan zal in de tweede draad een stroom ontstaan die evenredig is met de snelheid en de grootte van de stroomvariatie in de eerste draad. Bovendien ontdekte Faraday dat er ook een stroom in een draad ontstaat als men een magneet in de buurt van de draad beweegt. Hij stelde een wet op die de '*inductiewet van faraday'* werd genoemd en waarin de experimenteel onderzochte verschijnselen wiskundig werden beschreven. Deze inductiewet vormt de basis van een heel groot gebied van de moderne elektrotechniek en elektronica, immers de werking van dynamo's, elektromotoren, generatoren en transformatoren berust op deze wet. Als eerbewijs voor zijn werk werd later de eenheid van capaciteit, de Farad, naar hem vernoemd.

[34] 1831: Michael Faraday ontwerpt de '*faraday-schijf*'

Als een praktische toepassing van de door hem geformuleerde inductiewet ontwierp Michael Faraday de '*faraday-schijf*'. Dat is een gelijkstroom generator die bestaat uit een geleidende schijf die draait in een constant magneetveld dat loodrecht op de schijf invalt. Tussen de as en de rand van de schijf wordt een kleine gelijkspanning opgewekt, waarvan de richting afhangt van de draairichting van de schijf en de richting van het magneetveld. De opgewekte spanning is meestal maar een paar volt bij kleine demonstratiemodellen, maar grote generatoren voor onderzoeksdoeleinden kunnen honderden volt opwekken. De spanning wordt van de schijf afgenomen door middel van twee sleepcontacten. Een eigenschap van de faraday-schijf is dat het apparaat zeer grote stromen kan genereren, soms van meer dan een miljoen ampère, omdat de inwendige weerstand van de schijf bijzonder laag kan zijn.

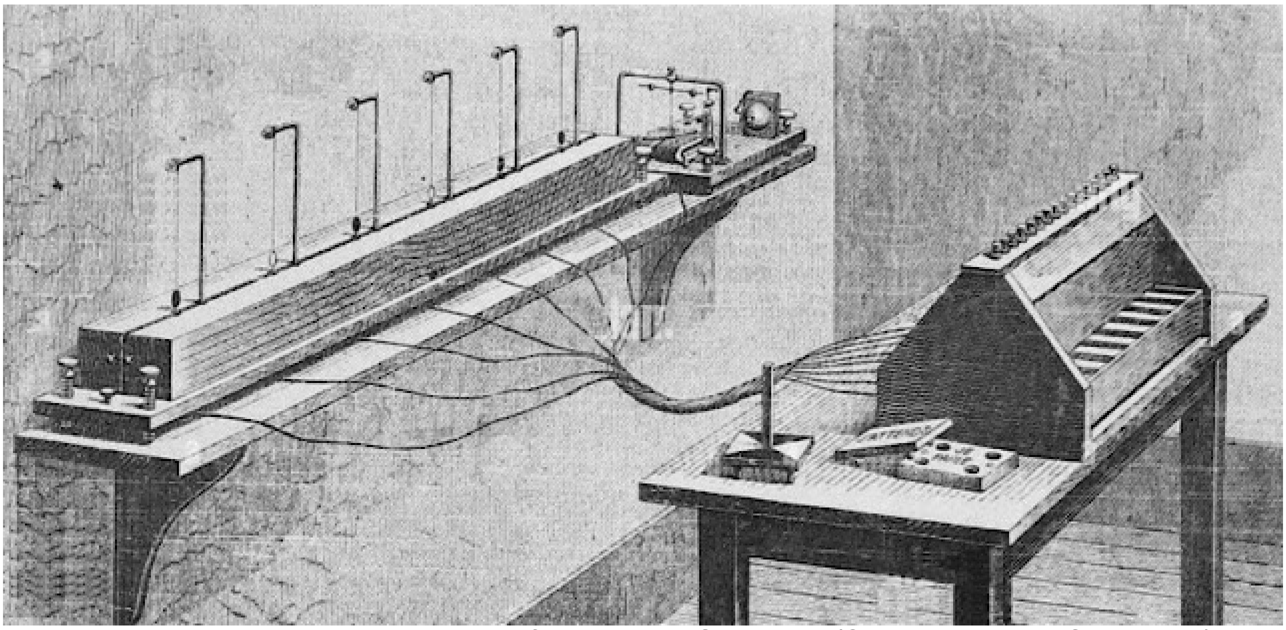


Samenstelling van een faraday-schijf.
(© 1884 Émile Alglave & J. Boulard)

[35] 1832: Pavel Schilling bouwt de eerste elektromagnetische telegraaf

Baron Pavel Lvovitsj Schilling von Cannstatt (1786 - 1837) was een Russisch diplomaat en wetenschapper die de eerste elektromagnetische telegraaf construeerde. Tijdens een reis had hij in München de eerste elektrochemische telegraaf van Sömmering in werking gezien. Na de ontdekking van elektromagnetisme door Ørsted ging Schilling aan de slag om op basis van dit nieuwe principe een werkbaarder telegrafiesysteem te ontwerpen. De eerste versie van zijn elektromagnetische telegraaf met twee magneetnaalden werd begin 1830 opgezet in Schillings appartement in Sint-Petersburg. Hij was daarbij de eerste die gebruik maakte van een tweedraads verbinding en ontwikkelde hierbij een binaire code voor het verzenden van het signaal. De magneetnaalden konden twee posities innemen boven een spoel en zo de inhoud van verzonden gegevens weergeven.

In 1832 volgde een uitgebreidere versie met zes magneetnaalden. Deze konden in totaal 64 karakters coderen. De naalden hingen boven spoelen aan zijden draden. Aan deze draden waren papieren schijven bevestigd die aan de ene kant wit en aan de andere kant zwart waren gekleurd. In rust waren de witte zijden zichtbaar. Als een spoel onder spanning werd gezet ging de naald draaien waardoor de zwarte zijde van de schijf zichtbaar werd. Er waren acht draden nodig tussen de zender en de ontvanger: zes voor het onder spanning zetten van de spoelen, een gemeenschappelijke retour en een attentiedraad die onder spanning werd gezet als de zender een bericht verstuurde.



De elektromagnetische telegraaf van Pavel Schilling. (© Library Book Collection)

[36] 1833: Faraday stelt zijn twee elektrolysewetten op

De reeds eerder besproken Faraday stelde twee wetten op die het verband beschrijven tussen de hoeveelheid elektrische lading die door een elektrolyt gaat en de hoeveelheid stof die wordt afgebroken of afgezet tijdens de elektrolyse.
De eerste Wet van Faraday stelt dat de massa m van een stof die tijdens elektrolyse wordt afgezet (of opgelost) recht evenredig is met de totale hoeveelheid elektrische lading Q die door het elektrolyt is gegaan.
De tweede Wet van Faraday stelt dat wanneer dezelfde hoeveelheid elektrische lading Q door verschillende elektrolyten wordt geleid, de massa's van de afgezette stoffen evenredig zijn met hun equivalent gewichten E.
Deze wetten vormen een fundamenteel principe in de chemie en worden nog steeds gebruikt in moderne toepassingen zoals galvanisatie, batterij-ontwikkeling en zuivering van metalen.

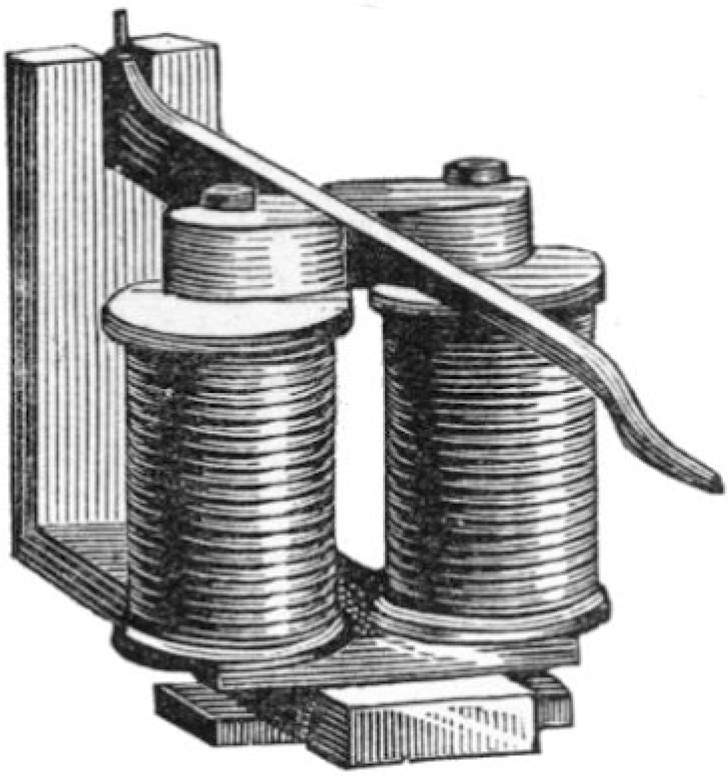
[37] 1834: Heinrich Lenz formuleert de '*wet van lenz*'

Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804 - 1865) was een Baltisch-Duits natuurkundige die vooral bekend is vanwege de naar hem genoemde '*wet van lenz*' die hij in 1834 formuleerde.
Wanneer een magnetisch veld in een gesloten geleider verandert, induceert dit een elektrische stroom in die geleider. De wet van lenz stelt dat de richting van de geïnduceerde stroom zodanig is dat het eigen magnetisch veld dat die stroom opwekt, de oorzaak van de verandering zo veel mogelijk probeert tegen te werken. Dit verschijnsel vormt de basis van de werking van een heleboel elektromagnetische apparaten.

[38] 1835: Joseph Henry vindt het relais uit

In de begindagen van de telegraaf verzwakte de sterkte van het signaal tijdens het afleggen van lange afstanden, waardoor het moeilijk werd om berichten betrouwbaar te verzenden over lange afstanden. Om deze beperking te omzeilen ontwierp Joseph Henry een apparaat dat relais werd genoemd. Het signaal op de telegraaf-lijn werd ontvangen op tussenstations waar het een contact aanstuurde dat het signaal op maximale sterkte regenereerde. Dit proces werd herhaald terwijl het signaal de lijn aflegde en zorgde ervoor dat het de

bestemming bereikte met voldoende sterkte om foutloos te worden ontvangen.



Het relais van Joseph Henry. (© 2017 Technicshistory)

[39] 1836: Thomas Davenport bouwt de eerste elektromotor

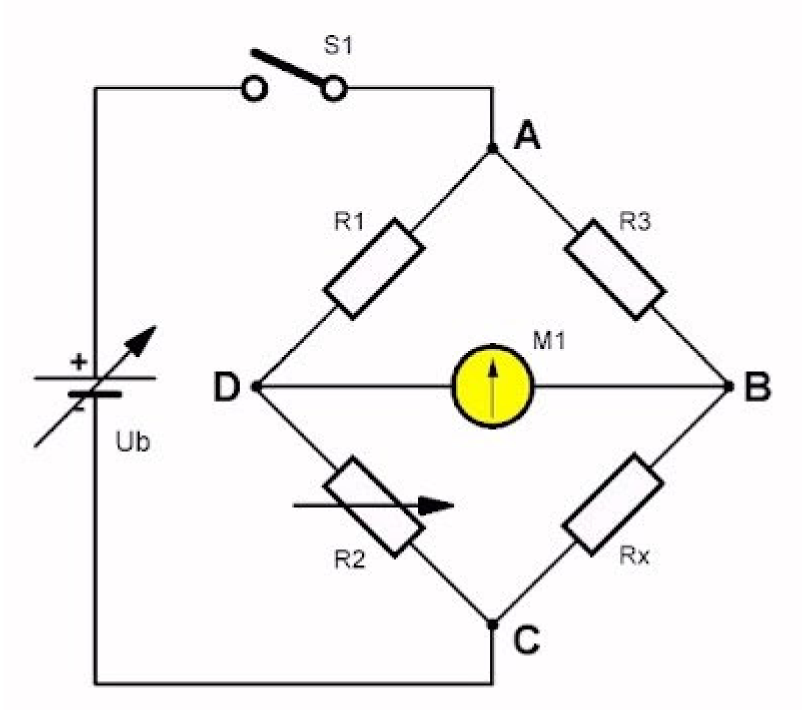
Thomas Davenport (1802 - 1851) was een Amerikaans smid die woonde in Forestdale (Vermont). Hij was een autodidact en was zeer geïnteresseerd in de nieuwe ontdekkingen en ontwikkelingen op het gebied van elektriciteit en magnetisme. Hij zocht contact met Joseph Henry en observeerde diens experimenten. Uit elektromagneten, die hij van Henry had gekocht, bouwde hij samen met zijn vrouw Emily de eerste gelijkstroom elektromotor.
Zijn eerste in 1834 ingediende patentaanvraag voor '*Improvement in propelling machinery by magnetism and electromagnetism*' werd echter geweigerd. Een tweede patentaanvraag, ondersteund door een paar beroemde wetenschappers, werd goedgekeurd. In 1837 bouwde hij met zijn elektromotor een model van een elektrisch aangedreven railvoertuig op een cirkelvormig railspoor.



Een replica van de motor van Thomas Davenport. (© National Maglab)

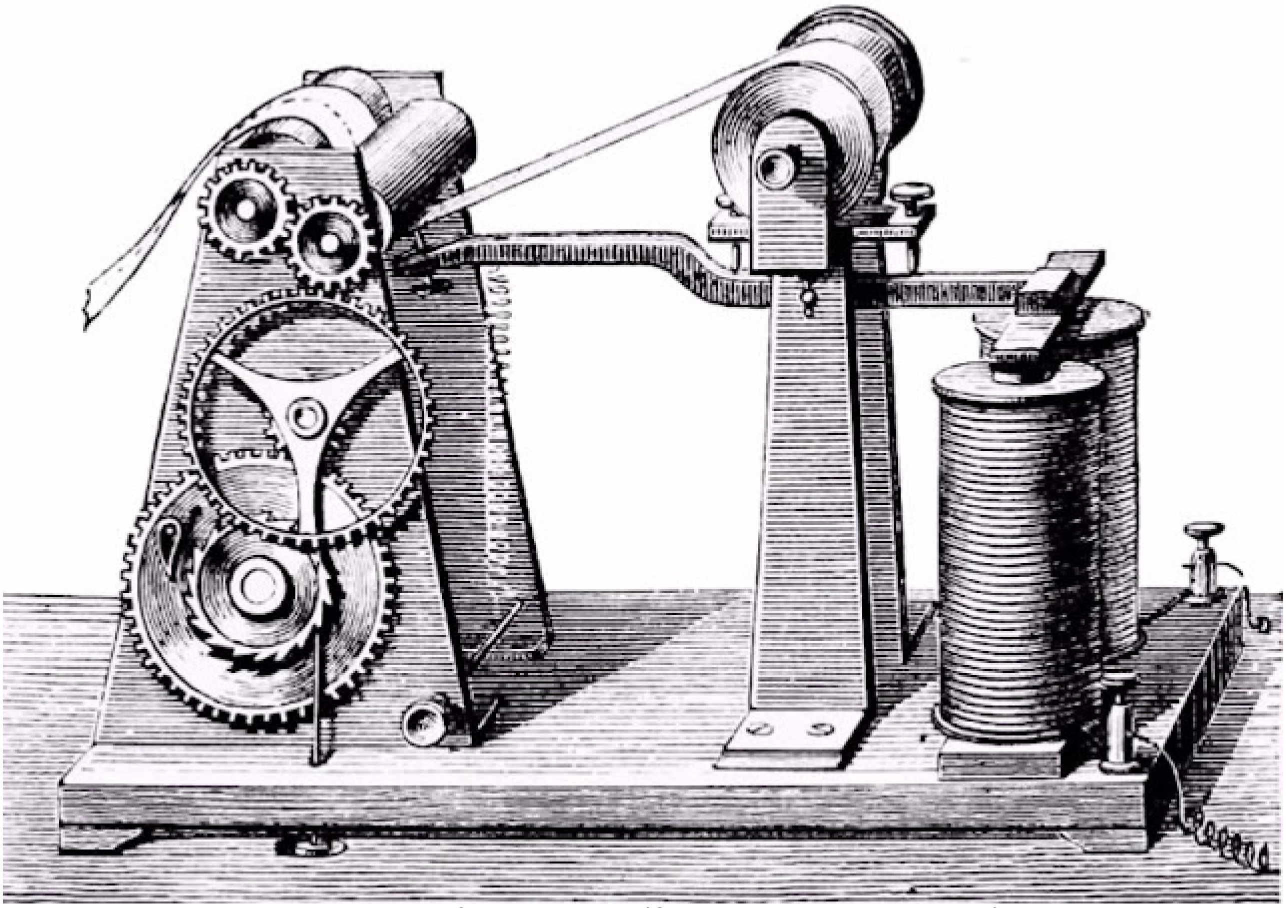
[40] 1837: Charles Wheatstone ontwikkelt de '*wheatstone-brug*'

Charles Wheatstone (1802 - 1875) was een Brits wetenschapper en uitvinder van verschillende wetenschappelijke doorbraken in het victoriaanse tijdperk. Een van zijn bekendste uitvindingen was uiteraard zijn '*brug van wheatstone*'. Met deze brug kunt u de waarde van een onbekende weerstand meten door deze in één zijde van de brug op te nemen, twee bekende weerstanden in twee overige zijden en een weerstandsdecade in de vierde zijde. Door deze decade af te regelen tot de brug in evenwicht is kunt u de waarde van de onbekende weerstand met een simpele formule berekenen.
In de onderstaande figuur is de samenstelling van een wheatstone-brug getekend. De weerstanden R1 en R3 zijn nauwkeurig bekende weerstanden, bijvoorbeeld exemplaren met een tolerantie van ±0,1 %. De weerstand R2 is de instelbare en afleesbare weerstandsdecade. De weerstand Rx is de onbekende, te meten weerstand.
De wheatstone-brug moet u voeden met een constante gelijkspanning U_b. In de tweede diagonaal zet u een gevoelige galvanometer M1. Bij het sluiten van de schakelaar S1 zal de naald van de galvanometer in een van de hoeken van de schaal terecht komen. U verdraait de knoppen van de weerstandsdecade tot de naald van de meter zo dicht mogelijk de nulstand in het midden van de schaal benadert. Als de naald van de galvanometer in het midden staat vloeit er geen stroom door het instrument. Dat kan alleen als de spanningen op de punten B en D aan elkaar gelijk zijn. Met de wet van ohm kunt u beredeneren dat dit het geval is als:
R2 / R1 = Rx / R3
Uit deze vergelijking volgt:
Rx = [R2 / R1] • R3
De waarden van R1 en R3 zijn bekend, u kunt de waarde van R2 aflezen van de knoppen van de decadenbank.



De brug van wheatstone. (© 2022 Jos Verstraten)

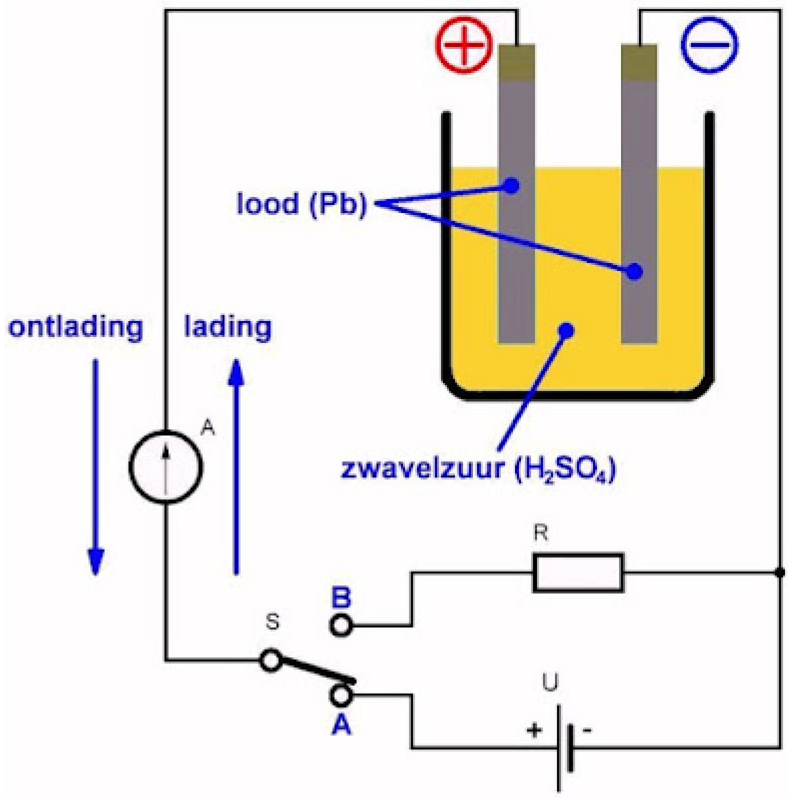
[41] 1837: Samuel Morse demonstreert de werking van zijn telegraaf
Samuel Finley Breese Morse (1791 - 1872) was een Amerikaans uitvinder en kunstschilder. Hij werd wereldwijd bekend door de ontwikkeling van een systeem voor elektrische telegrafie en de naar hem vernoemde morse-code.
Morse bedacht een manier om met behulp van een seinsleutel, een elektromagneet en een twee-aderige kabel berichten heel ver te versturen. In 1835 bouwde hij een eerste proefopstelling van zo'n telegraaftoestel. De volgende twee jaar werkte hij aan een code om de letters uit het alfabet om te zetten in korte en lange elektrische stroomstootjes. Dat werd de wereldberoemde morse-code. Toen hij in 1837 zijn uitvinding demonstreerde om financiële steun te verkrijgen vond men het praktisch belang van zijn uitvinding echter te gering om er in te investeren. Twee jaar later probeerde hij het opnieuw en ontving hij 30.000 dollar voor de aanleg van een telegraaflijn tussen Washington en Baltimore. Op 27 mei 1844 werd het eerste bericht over deze lijn verzonden. Samuel Morse werd wereldberoemd. Zijn telegraaf was immers eenvoudig van constructie en er waren slechts twee draden nodig voor een verbinding. De morse-code was snel aan te leren.
Met de seinsleutel zet men korte en lange spanningspulsjes op de lijn, uiteraard volgens de morse-code. Voor het zenden van de letter A is één korte en één lange puls nodig. De langste code is gekoppeld aan het cijfer nul dat vijf lange pulsjes vereist. In de ontvanger bekrachtigen deze pulsjes een elektromagneet. Deze magneet trekt een ijzeren anker aan waaraan een pen is bevestigd. Deze pen zet de korte en lange streepjes van de morse-code op een papieren strip die wordt afgerold van een rol.



De telegraaf van Morse. (© diyhomeschooler.com)

[42] 1839: William Grove ontwikkelt de eerste brandstofcel
William Robert Grove (1811 - 1896) was een Brits jurist en natuurwetenschapper. Grove is samen met de Zwitser Christian Friedrich Schönbein bekend als de '*vader van brandstofcel*'. In 1839 ontwikkelde Grove een '*gaseous voltaic battery*' die wordt beschouwd als de voorloper van de moderne brandstofcel. Grove voerde een experiment uit waarbij twee platina strips zijn geplaatst in een oplossing van verdund zwavelzuur. De ene strip staat daarbij in contact met waterstofgas, de andere met zuurstofgas. Hij ontdekte dat er dan een elektrische stroom tussen beide strips loopt. Deze stroom kan worden gebruikt voor het voeden van elektrische apparatuur.

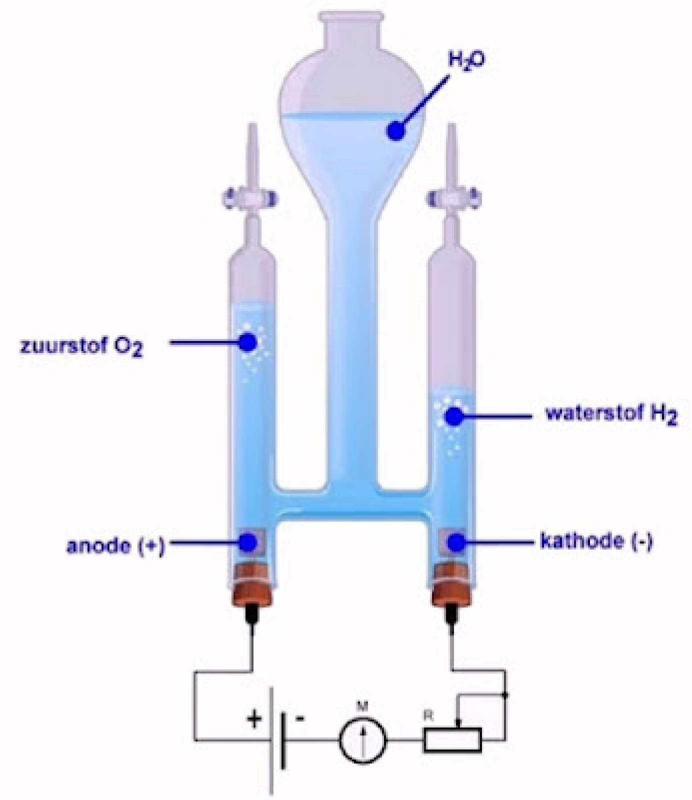
[43] 1859 - Gaston Planté vindt de accumulator uit
Gaston Planté (1834 - 1889) was een Frans natuurkundige en uitvinder. De uitvinding van de accumulator wordt aan hem toegeschreven. In 1859 deed hij een proef die wordt toegelicht aan de hand van onderstaande figuur. In een glazen bak werden twee loden elektroden opgehangen in een bad met verdund zwavelzuur. Het zal duidelijk zijn dat een dergelijke opstelling nooit een primaire elektrochemische cel kan vormen, omdat twee platen van hetzelfde metaal worden toegepast en daartussen nooit een elektrische spanning kan ontstaan. Planté sloot de twee loden platen via een ampère-meter A en een omschakelaar S aan op een primaire cel U of op een weerstand R. Als hij de schakelaar S in de stand A zette, stelde hij vast dat er een stroom uit de cel naar de opstelling vloeide. Na enige tijd werd deze stroom steeds lager en nam af tot nul. Als hij vervolgens de opstelling loskoppelde van de cel door de schakelaar om te schakelen van A naar B, stelde hij vast dat er weer een stroom door de kring ging vloeien, maar nu in tegengestelde richting. Als er een stroom vloeit, dan moet er ook een spanning zijn. Nu is het zeer onwaarschijnlijk dat die spanning ontstaat in de weerstand R of in de ampèremeter A. De voor de hand liggende conclusie is dat alleen de bak met loden platen en zwavelzuur verantwoordelijk kan zijn voor het ontstaan van een spanning in de kring. Hij stelde vast dat de stroom na een tijdje kleiner werd en naar nul ging. De eerst accu was geboren!



De lood-accumulator van Planté. (© 2018 Jos Verstraten)

[44] 1866: August Wilhelm von Hofmann ontwerpt zijn '*volta-meter*'

August Wilhelm von Hofmann (1818 - 1892) was een Duitse chemicus. Er zijn verschillende geleerden, zoals Volta, Davy en Faraday, die experimenten op het gebied van elektrolyse hebben uitgevoerd. Von Hofmann was echter de eerste die serieuze, analytisch verantwoorde experimenten uitvoerde op dat gebied. Hij bouwde een apparaat, dat '*volta-meter*' werd genoemd en er uit zag zoals voorgesteld in onderstaande figuur. Het glazen apparaat bestaat uit drie buizen die met elkaar in verbinding staan. De middelste buis is het voorraadvat, waarlangs de te onderzoeken oplossing wordt aangevoerd. De linker en rechter buizen hebben aan de onderzijde kleine elektroden van platina, waartussen een gelijkspanning wordt aangesloten. Beide buizen zijn voorzien van een kraantje, zodat u de gassen die eventueel geproduceerd worden kunt aftappen.



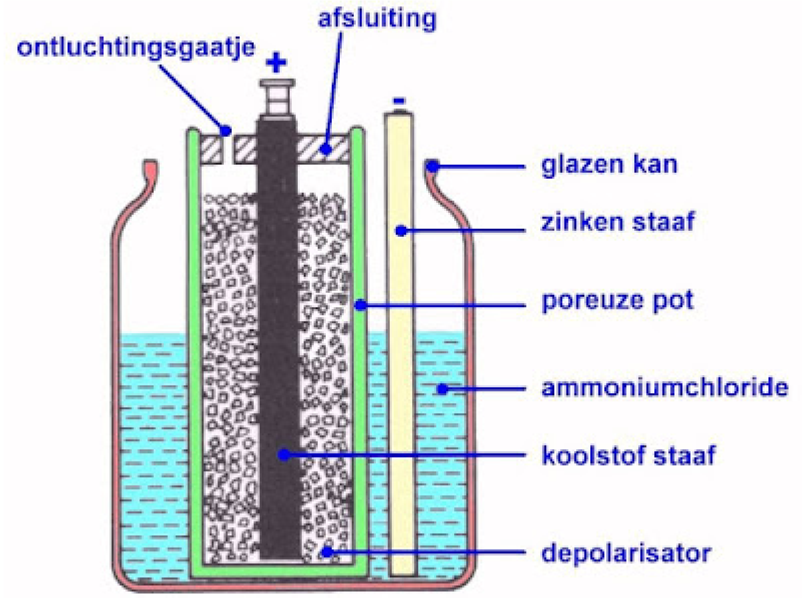
De volta-meter van Hoffmann. (© 2018 Jos Verstraten)

Het experiment van Hofmann is klassiek geworden in de natuurkunde en u kunt het gemakkelijk herhalen. Bij dit experiment vult u de opstelling volledig met gedestilleerd water, waaraan u een paar druppeltjes zuur hebt toegevoerd om er zeker van te zijn dat de vloeistof een bepaalde mate van elektrische geleidbaarheid gaat vertonen. U draait de twee kraantjes open en u giet via de middelste buis zoveel aangezuurd water in het apparaat tot het water uit beide kraantjes spuit. Nadien sluit u de kraantjes. Op deze manier bent u er zeker van dat er alleen water in het apparaat zit en alle gassen verdreven zijn. Vervolgens sluit u een batterij, die in serie staat met een ampèremeter en een regelbare weerstand, aan tussen de twee elektroden. Na het sluiten van de stroomkring merk u op dat er een stroom door het apparaat gaat lopen en dat er aan beide elektroden kleine gasbelletjes ontstaan. Deze belletjes stijgen uiteraard op in de twee buitenste glazen buizen. De twee buitenste buizen worden met gas gevuld, dat het aangezuurde water terug drukt naar de middelste kolom. U merkt op dat in de buis die verbonden is met de negatieve pool van de batterij exact twee keer zo veel gas ontstaat dan in de linker kolom. Na enige tijd is er in beide buizen zoveel gas gevormd dat u dit via de kraantjes kunt aftappen. U ontdekt dat aan de negatieve pool zuiver waterstof gas ontstaat en aan de positieve pool zuiver zuurstof gas en wel in de verhouding 2/1.

[45] 1866: Georges Leclanché vindt de '*cel van leclanché*' uit

Georges Leclanché (1839 - 1882) was een Frans elektrotechnicus. Deze Fransman maakte in 1866 een elektrische cel, waarvan de samenstelling getekend is in onderstaande figuur. Deze cel gaat sindsdien door het leven onder de naam '*cel van leclanché*' en deze vormt nu nog steeds de basis van een heleboel goedkope batterijen die u in iedere supermarkt kunt kopen. De cel bestaat uit een glazen pot, die gevuld wordt met een verdunde oplossing van ammoniumchloride (salmiak) als elektrolyt. De ene elektrode wordt gevormd door een zinken staaf, de tweede door een staaf uit koolstof. De koolstof staaf hangt echter niet rechtstreeks in het elektrolyt, maar zit in een poreuze pot, die gevuld is met een mengsel van koolstofpoeder en magnesiumoxide. Deze stoffen gaan het polariseren van de cel tegen. Op de positieve pool wordt waterstofgas gevormd. Het magnesiumoxide zorgt er echter voor dat dit waterstofgas een chemische reactie aangaat, waardoor het gebonden wordt en de koolstaaf niet met microscopische gasbelletjes kan afsluiten. Uit de spanningsreeks kunt u afleiden dat de cel van leclanché een spanning afgeeft van 0,74 V + 0,76 V = 1,5 V.
De cel van leclanché werd zeer lang overal toegepast. Het enige nadeel van de cel is dat de depolarisator vrij traag werkt. Als er een grote stroom uit de cel getrokken wordt, zal er zoveel

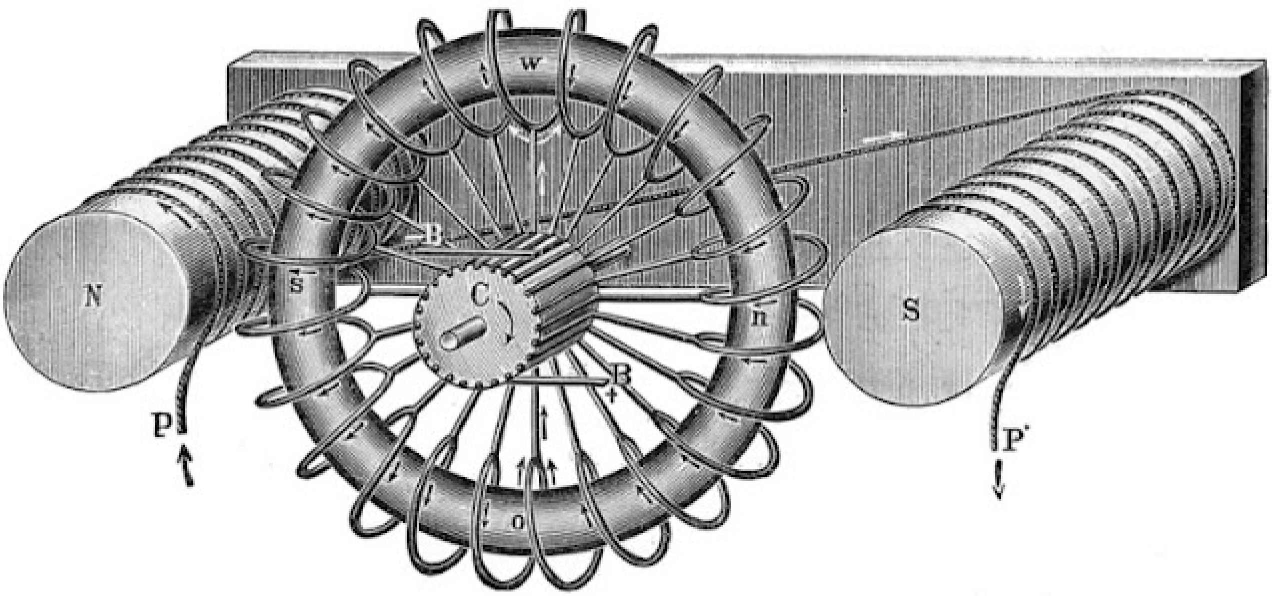
waterstofgas rond de koolstaaf ontstaan, dat het magnesiumoxide niet in staat is dit om te zetten. Vandaar dat de cel dan toch langzaam polariseert, met als gevolg dat de spanning gaat dalen. Als u de cel nadien echter een tijdje niet belast zal het magnesiumoxide zijn werk blijven doen en het gevormde waterstof omzetten. Nadien levert de cel weer zijn volle spanning van 1,5 V.



De cel van leclanché. (© 2017 Jos Verstraten)

[46] 1869: Zénobe Théophile Gramme construeert zijn '*gramme-dynamo*'

Zénobe Théophile Gramme (1826 - 1901) was een Belgisch elektrotechnisch ingenieur. In 1869 vond hij de naar hem genoemde '*gramme-dynamo*' uit. In 1871 demonstreerde Gramme deze machine voor het eerst aan de Académie des Sciences in Parijs. De gramme-dynamo is samengesteld uit een vast gedeelte, stator genoemd, en een draaiend gedeelte, de rotor. De rotor is opgebouwd uit een ringvormig anker van weekijzer dat vrij kan ronddraaien. Rond dit anker is een dertigtal spoelen van koperdraad gewikkeld die in serie zijn geschakeld. Iedere tussenliggende verbinding is aangesloten op een commutator waarover twee koolborstels lopen. In de stator wordt met behulp van twee spoelen en een gelijkspanning een magneetveld gecreëerd dat ook door het ronddraaiende ringanker en over de ankerspoelen loopt. Hierdoor wordt er een inductiespanning opgewekt in twee tegenover elkaar liggende spoelen van het anker. Deze geïnduceerde spanning komt via de commutator op de koolborstels te staan en kan elektrisch vermogen leveren aan een aangesloten weerstand.



De dynamo van Gramme. (© 1905 Kogo)

[47] 1873: James Clerk Maxwell publiceert zijn vier '*maxwell-vergelijkingen*'
James Clerk Maxwell (1831 - 1879) was een Schots wis- en natuurkundige. Met Albert Einstein en Isaac Newton wordt hij tot de grootste natuurkundigen gerekend. In zijn boek '*A Treatise on Electricity and Magnetism*' publiceert hij in 1873 de uiteindelijke versies van zijn vier '*maxwell-vergelijkingen*'. Op deze vergelijkingen is de gehele klassieke elektromagnetische theorie gebouwd. Deze wetten zijn alleen te begrijpen door iemand die wiskunde heeft gestudeerd. Maar laten wij tóch een poging wagen de betekenis van die vier formules te verduidelijken, met dank aan ChatGPT voor de uitleg. De vier maxwell-vergelijkingen vormen samen de taal van de natuur als het gaat om elektriciteit en magnetisme. Ze leggen uit hoe elektrische en magnetische velden ontstaan, hoe deze zich gedragen en hoe zij met elkaar in wisselwerking komen.

Gauss Law	$\nabla E = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$
Gauss Magnetism	$\nabla B = 0$
Faraday Law	$\nabla \times E = \frac{-\partial B}{\partial t}$
Ampere law	$\nabla \times B = \mu_0 (J + \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t})$

De vier Maxwell-vergelijkingen.

- Gauss' wet voor het elektrisch veld
  Deze wet vertelt ons dat de elektrische velden rondom een lading als het ware uitstralen. Als u een denkbeeldige gesloten oppervlakte (bijvoorbeeld een bal) rond een lading plaatst, dan bepaalt het totale elektrisch veld dat door deze oppervlakte 'stroomt' hoeveel lading er binnenin zit. Met andere woorden: meer lading betekent een sterker veld dat eruit stroomt.
- Gauss' wet voor het magnetisch veld
  In tegenstelling tot elektrische velden, hebben magnetische velden geen 'begin' of 'einde'. Dit komt omdat magneten altijd twee polen hebben, een noordpool en een zuidpool. De totale magnetische flux (het 'stroomsysteem' van het magnetisch veld) door een gesloten oppervlakte is dus altijd nul. Er bestaat dus geen 'magnetische bron' zoals bij elektrische ladingen.
- Wet van Faraday
  Faraday ontdekte dat een veranderend magnetisch veld in een lus (bijvoorbeeld een draadkring) een elektrisch veld opwekt. Dit betekent dat als een magneet beweegt ten opzichte van een spoel, er een stroom in de spoel gaat lopen.
- Ampère-Maxwell wet
  Deze wet laat zien dat een elektrische stroom, of een veranderend elektrisch veld, een magnetisch veld veroorzaakt. Oorspronkelijk ontdekte Ampère dat stromende elektriciteit een magnetisch veld creëert, maar Maxwell voegde toe dat ook een veranderend elektrisch veld een magnetisch veld kan genereren.

De vier maxwell-vergelijkingen laten zien hoe elektrische en magnetische velden met elkaar omgaan:

- Elektrische velden ontstaan uit ladingen.
- Magnetische velden hebben geen losse bronnen, omdat magneten altijd twee polen hebben.

- Een veranderend magnetisch veld zal een elektrisch veld (en dus een elektrische stroom) veroorzaken.
- Een elektrische stroom of een veranderend elektrisch veld zal een magnetisch veld opwekken.

[48] 1873: Willoughby Smith ontdekt de lichtgevoeligheid van seleen
Willoughby Smith (1828 - 1891) was een Engels elektrotechnicus die in 1873 de fotogeleiding van het element seleen ontdekte. Toevallig kwam hij erachter dat de geleiding van seleen sterk toenam naarmate het meer werd blootgesteld aan daglicht. Hij had de staven opgeslagen in een met een deksel afgesloten doos. Wanneer de doos gesloten was, was de weerstand van het materiaal het hoogst. Werd de doos geopend en viel er op de staven een fel zonlicht dan nam de geleiding met 15 % tot 100 % toe.
Zijn ontdekking leidde tot de uitvinding van de foto-elektrische cellen.

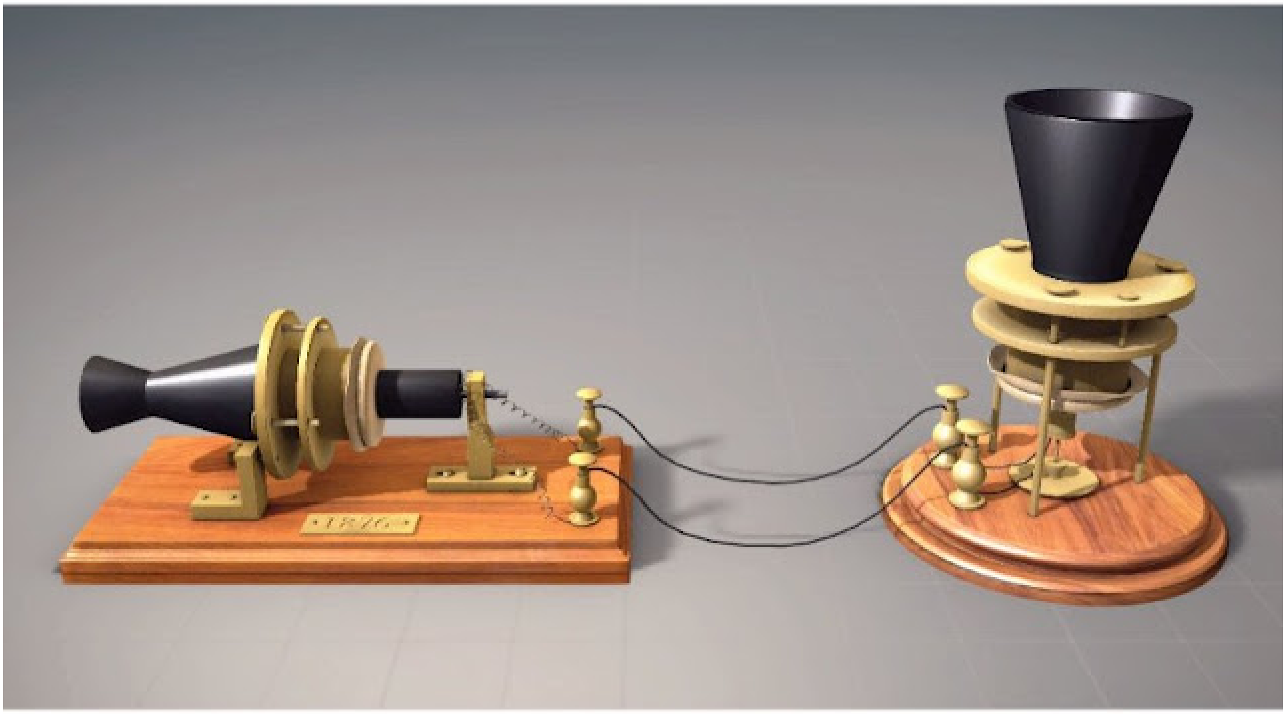
[49] 1874: Karl Ferdinand Braun vindt de kristaldetector uit
Karl Ferdinand Braun (1850 - 1918) was een Duits natuurkundige en medeoprichter van Telefunken. In 1909 won hij de Nobelprijs voor de Natuurkunde voor zijn bijdragen aan de ontwikkelingen van de draadloze telegrafie. In 1874 ontdekte Braun de asymmetrische geleidingseigenschappen van bepaalde materialen. Deze ontdekking toonde aan dat bepaalde halfgeleiderverbindingen elektriciteit gemakkelijker in de ene richting geleiden dan in de andere. Zijn ontdekking leidde tot de ontwikkeling van de eerste puntcontact diode, de kristaldetector. Dat was een van de eerste échte toepassingen van halfgeleidende materialen. Die uitvinding maakte de weg vrij voor alle toekomstige halfgeleiders, zoals de moderne diodes en transistors.



De kristaldetector van Braun. (© 2007 J. A. Davidson)

[50] 1876: Alexander Graham Bell krijgt een patent op zijn telefoon
Alexander Graham Bell (1847 - 1922) was een Schots-Amerikaans uitvinder, autodidact en de oprichter van de telefoonmaatschappij Bell, die uitgroeide tot de American Telephone and Telegraph Company (AT&T).
Toen hij leraar was begon hij in zijn vrije tijd onderzoek te doen naar de elektrische overdracht van geluid van de ene plaats naar de andere. Op 14 februari 1876 diende Bell zijn octrooi aanvraag voor zijn telefoon in. Het octrooi werd op 7 maart toegekend en drie dagen later sprak Bell tegen zijn assistent Watson de historische woorden in zijn telefoon: '*Mr. Watson,*

come here. I want to see you'. Watson, die in een andere kamer van het huis verbleef, kwam direct.



Een replica van de telefoon van Bell. (© Mozaik Education)

De telefoon van Bell bestaat uit een microfoon, een batterij, een twee-draad verbinding en een luidspreker. De microfoon bevat niets meer dan een elektromagneet met daarvoor een strakgespannen membraan. Zodra het membraan door spraak in trilling wordt gebracht, worden er stromen geïnduceerd in de windingen van de elektromagneet. Deze stromen lopen via de lijn naar de ontvanger. Daar bevindt zich een identiek apparaat, maar dat andersom werkt. De wisselstroom in de lijn wekt een magnetisch veld op in de spoel. Dit brengt een membraan aan het trillen, waardoor de elektrische wisselstroom wordt omgezet in geluid.

[51] 1878: Joseph Wilson Swan laat de eerste bruikbare gloeilamp zien
Joseph Wilson Swan (1828 - 1914) was een Engelse schei- en natuurkundige die bekend werd door de rol die hij speelde in de ontwikkeling van de gloeilamp. Daarnaast leverde hij een belangrijke bijdrage aan de fotografie door de uitvinding van het droge fotopapier. Zijn eerste gloeilamp maakte hij van een strookje verkoold papier tussen twee elektrodes in een vacuüm gezogen glazen bol. Voor praktische toepassingen was dit model echter volledig ongeschikt. Vanwege het niet ideale vacuüm bleef er een beetje zuurstof achter in de bol, waardoor de koolstof in het verkoold strookje papier snel tot as verbrandde en de levensduur van de gloeilamp sterk verkortte. In 1878 maakte hij een veel beter werkende gloeilamp met een gloeidraad van verkoold cellulose, die op 19 december 1878 werd gedemonstreerd tijdens een bijeenkomst van de Chemical Society in Newcastle. Swans huis in Gateshead was het eerste ter wereld dat met gloeilampen werd verlicht.



Een replica van de gloeilamp van Swan.
(© 1908 Science Museum Group Collection)

[52] 1879: Thomas Alva Edison verbetert de gloeilamp van Swan
Aan de andere kust van de Atlantische Oceaan was Thomas Alva Edison (1847 - 1931) met precies hetzelfde bezig: het ontwerpen van een goed werkende gloeilamp. Edison gebruikte echter koolstofvezels als gloeidraad wat een langere levensduur opleverde. Om zijn product bekend te maken bij de bevolking liet hij op oudejaarsavond 1879 rondom zijn laboratorium in Menlo Park tientallen gloeilampen branden als feestversiering. Edison was niet alleen een goed technicus, maar had veel commercieel inzicht. Hij begreep dat zijn gloeilamp alleen een commercieel succes kon worden als er elektriciteit beschikbaar was. Om in ieder huis zijn gloeilamp te laten branden legde Edison dus een complete elektrotechnische infrastructuur aan.

[53] 1880: Pierre en Jacques Curie ontdekken het piëzo-elektrisch effect
De Fransmannen Jacques Curie (1855 - 1941) en zijn broer Pierre (1859 - 1906) ontdekten in 1880 de piëzo-elektriciteit, het genereren van een elektrische spanning als op bepaalde kristallen druk wordt uitgeoefend. Ze toonden het effect aan in toermalijn, kwarts, topaas en kaliumnatriumtartraat. In een piëzo-elektrisch kristal zijn de positieve en negatieve elektrische ladingen gescheiden. Door een vervorming van het kristal wordt de symmetrie van het kristal verbroken en wordt een elektrische spanning gegenereerd. Ook het omgekeerde effect bestaat: wanneer een elektrische spanning in de juiste richting op een piëzo-elektrisch kristal wordt aangelegd, worden de ladingen in verschillend beïnvloed, waardoor een mechanische vervorming in het kristal ontstaat.
Het piëzo-elektrisch effect heeft tal van toepassingen in de elektronica gevonden: microfoons, luidsprekertjes, zoemertjes, pick-up elementen, piëzo-elektrische printkoppen, nevelproducerende transducers, vonkgeneratoren. Afhankelijk van de toegevoerde mechanische energie kan de spanning die hierbij wordt opgewekt variëren van een paar millivolt (geluidstrillingen bij microfoons en pick-up elementen) tot duizenden volt bij gasaanstekers (een hamertje dat tegen het kristal slaat).



Een waternevel producerende piëzo-ceramische transducer.
(© 2024 Jos Verstraten)

[54] 1880: James Wimshurst vindt zijn '*wimshurst-machine*' uit
James Wimshurst (1832 - 1903) was een Engelse uitvinder, technicus en scheepsbouwer die bekend is geworden als de vader van de '*wimshurst-machine*'. Dit apparaat wekt zeer hoge spanningen op. Kenmerkend zijn twee in tegengestelde richting draaiende schijven, twee kruislings geplaatste staven met metalen borstels en een vonkbrug. De twee schijven zijn gemaakt van glas of eboniet en zijn bekleed met strips van tin- of zilverfolie. Een strip krijgt lading geïnduceerd door de in tegengestelde richting draaiende strips van de andere schijf. Deze lading wordt afgevangen door metalen borstels en getransporteerd naar de leidse flessen op de hoeken van de machine. De leidse flessen verzamelen de lading tot het moment dat de spanning over de vonkbrug zo groot is geworden dat er een vonk overspringt, waarna het proces zich herhaalt.



Een moderne versie (€ 89,00) van de wimshurst-machine. (© Amazon)

[55] 1881: De Internationale Elektriciteitstentoonstelling in Parijs
Het jaar 1881 is een zeer belangrijk jaar voor de elektrotechniek. In dat jaar werd in Parijs de eerste Internationale Elektriciteitstentoonstelling georganiseerd. Onderdeel van de tentoonstelling was de eerste Internationale Bijeenkomst van Elektrotechnici die werd gehouden in de zalen van het Palais du Trocadéro. Daar werden voor het eerst de eenheden ampère, coulomb, farad, ohm en volt ondubbelzinnig gedefinieerd. Dank zij deze definities kon men experimentele resultaten en wiskundige formules op elkaar afstemmen en in de literatuur beschreven experimenten tot in alle details herhalen.

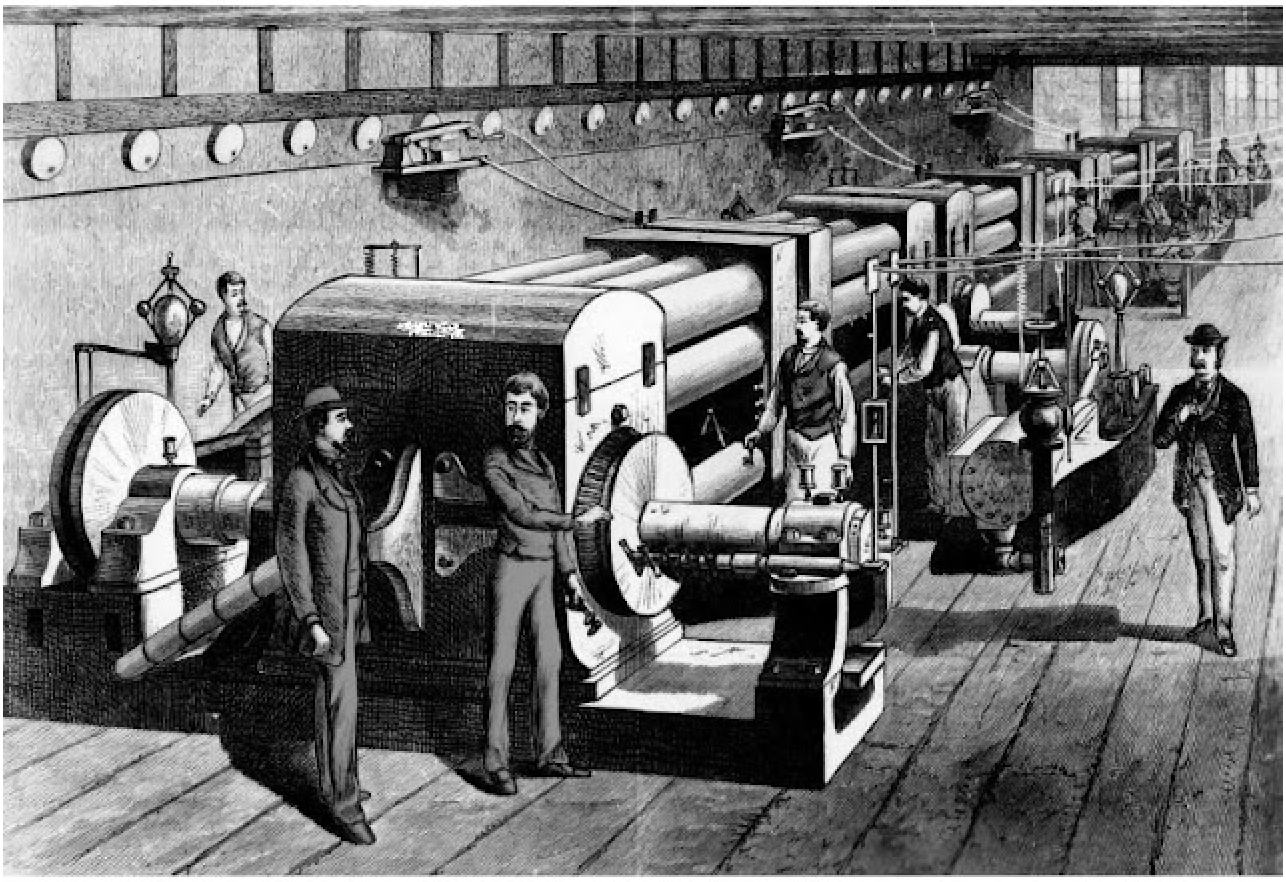
[56] 1881: Lucien Gaulard en John Dixon Gibbs demonstreren de transformator
Lucien Gaulard (1850 - 1888) was een Frans wetenschapper en uitvinder van toestellen om elektriciteit in de vorm van wisselstroom te transporteren. Later zouden deze apparaten transformatoren worden genoemd. De eerste vermogenstransformator die Gaulard samen met zijn Engelse collega John Dixon Gibbs ontwikkelde werd in 1881 tentoongesteld in Londen, waar het de interesse wekte van de Amerikaan George Westinghouse. Westinghouse importeerde een aantal Gaulard-Gibbs transformatoren en experimenteerde ermee in zijn bedrijf in Pittsburgh. In 1885 bouwt Westinghouse de eerste praktische transformator die gebaseerd was op Gaulards idee en gezien wordt als voorganger van de moderne transformator.



Een replica van de eerste Gaulard-Gibbs transformator.
(© 1985 G. Ferraris)

[57] 1881: Werner von Siemens bouwt de eerste '*dynamo*'
Ernst Werner von Siemens (1816 - 1892) was een Duitse uitvinder en industrieel en de mede-oprichter van het Telegraphen Bauanstalt von Siemens & Halske industrieel imperium. De eenheid siemens (S) voor elektrische geleidbaarheid is naar hem vernoemd. Hoewel Siemens een heleboel uitvindingen heeft gedaan is een van de meest bekende de ontwikkeling van het dynamo-principe. Het magneetveld, dat bij iedere generator noodzakelijk is, wordt bij de dynamo opgewekt door een deel van de door de generator opgewekte stroom. Er zijn dus geen permanente magneten of een afzonderlijke batterij meer nodig voor het opwekken van het magneetveld. Werner von Siemens gaf zijn machine de naam '*dynamo*' afgeleid van het Griekse woord dunamis (energie). Het vermogen van Siemens eerste dynamo bedroeg 29 watt.

[58] 1882: Edison opent de eerste elektriciteitscentrale in New York
In 1882 bouwde Thomas Edison in New York het Pearl Street Station, de eerste speciaal gebouwde elektriciteitscentrale. Deze centrale voorzag de financiers van Wall Street en de krant The New York Times van het eerste elektrisch licht. De centrale brandde in 1890 af, maar stond model voor andere centrales in de stad. Tegenwoordig bestaat de Edison Electric Illuminating Company nog steeds in de vorm van Con Edison.

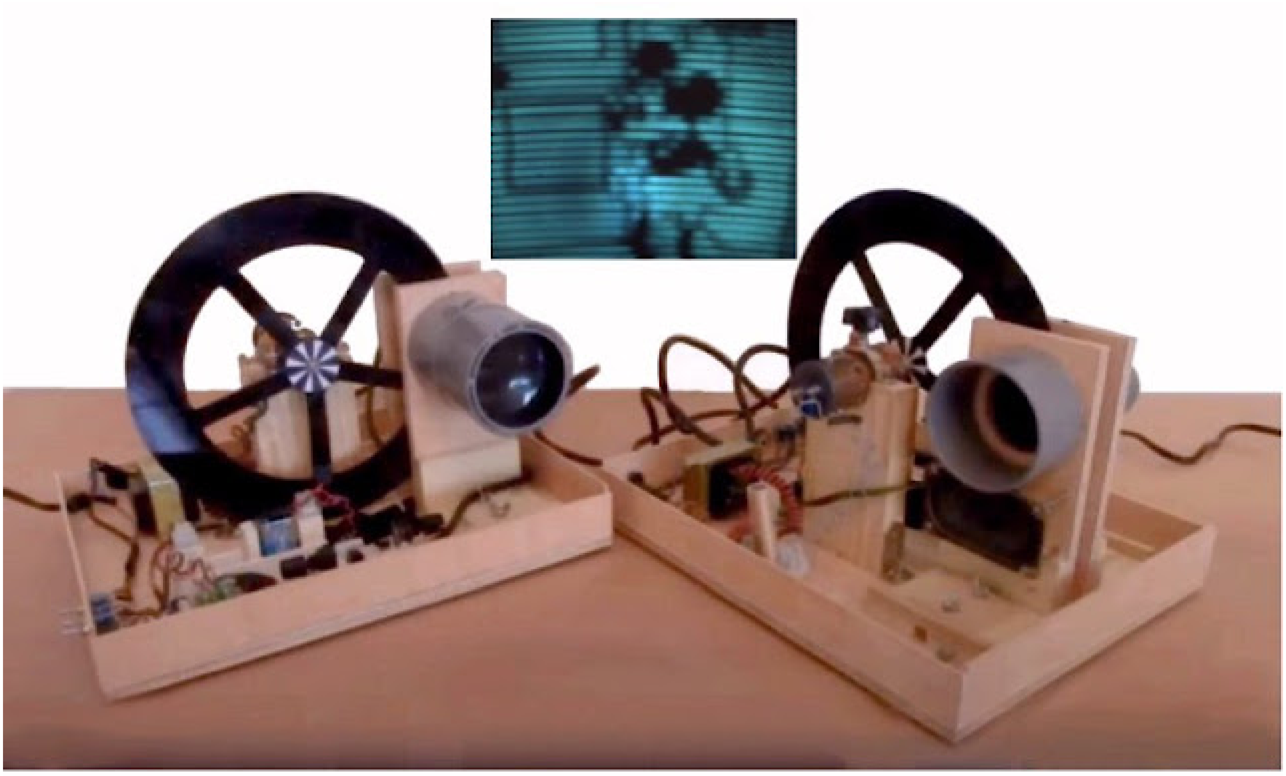


Edison's Pearl Street Station. (© Science Source)

[59] 1883: Edison ontdekt het '*edison-effect*'
In metaalatomen zijn per definitie een of twee elektronen aanwezig die vrij kunnen bewegen. Bij normale temperaturen kunnen deze elektronen hun atoom niet verlaten. Wordt het metaal verhit dan wordt door de warmtetrillingen de band tussen de elektronen en hun atomen losser. Bij een bepaalde temperatuur wordt de kinetische energie van het elektron zo groot dat het zijn atoom kan verlaten en dus wordt uitgestoten. Rond het metaaloppervlak ontstaat een wolk van vrije elektronen. Deze thermische emissie ligt aan de basis van de volledige elektronenbuizen technologie met verhitte kathodes. In iedere buis wordt er immers gebruik van gemaakt!
Het verschijnsel werd voor het eerst beschreven in 1873 door Frederick Guthrie (1833 - 1886) die er echter het belang niet van inzag. Het effect werd in 1883 herontdekt door Thomas Edison toen hij het fenomeen waarnam in zijn gloeilamp, waar na verloop van tijd de binnenkant van het glas zwart begon uit te slaan. Om dit te beperken bevestigde Edison een extra plaatje in zijn gloeilamp. Hij ontdekte dat wanneer het plaatje een positieve spanning had ten opzichte van de gloeidraad er door het vacuüm een stroom ging lopen. Bij een negatieve spanning liep er geen stroom. Vanwege deze zeer belangrijke experimenten die de start betekenden van de ontwikkeling van elektronenbuizen wordt de thermische emissie het '*edison-effect*' genoemd.

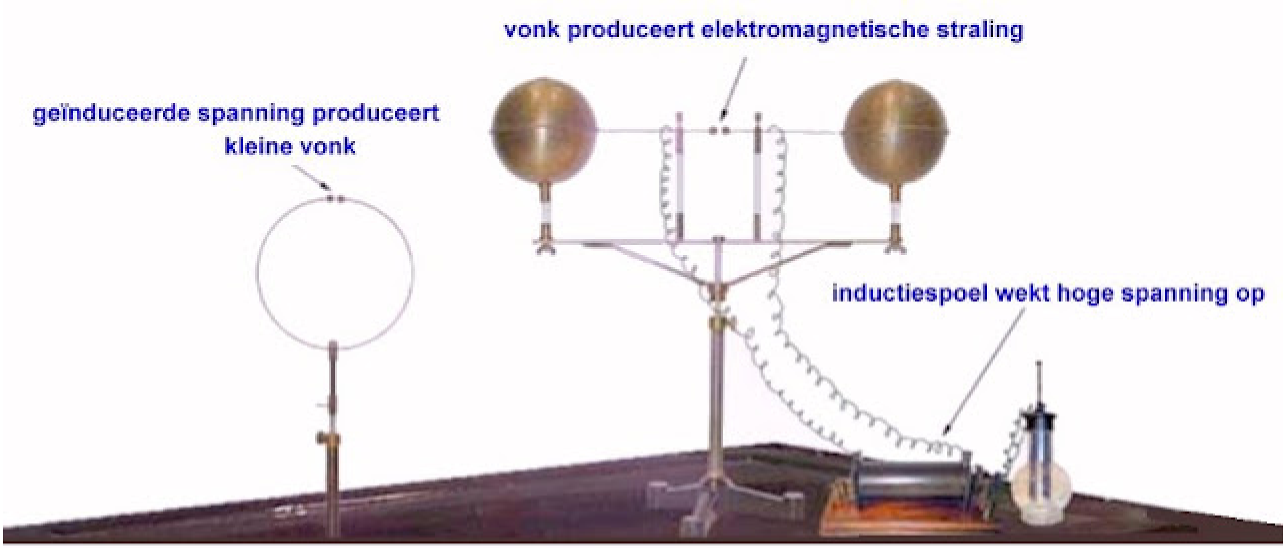
[60] 1885: Paul Julius Gottlieb Nipkow vindt de '*nipkow-schijf*' uit
Paul Julius Gottlieb Nipkow (1860 - 1940) was een Duitse uitvinder. Hij is de grondlegger van de televisie omdat hij de '*nipkow-schijf*' uitvond. De nipkow-schijf is een systeem waarmee een beeld lijn na lijn kan worden gescand en omgezet in een video-signaal dat nadien via een tweede identieke schijf weer tot een beeld kan worden getransformeerd.
De zender bestaat uit een roterende metalen schijf met daarop in spiraalvormige banen een serie kleine gaatjes. Elk gaatje is op een andere straal aangebracht, zodat bij één omwenteling elk gaatje één horizontale lijn van het beeld afscant. Achter de schijf staat een lichtgevoelige cel (in die tijd een seleniumcel) die de lichtintensiteit in elke punt van de lijn meet. Door de gemeten lichtsterkte per gaatje om te zetten in een elektrisch signaal ontstaat een reeks spanningen die de helderheidswaarden van alle punten in het beeld beschrijft.

Dit videosignaal wordt via een kabel naar de ontvanger gestuurd. In de ontvanger bevindt zich een identieke nipkow-schijf die exact met dezelfde snelheid (en startpositie) moet draaien als die bij de zender. Deze synchronisatie gebeurt met speciale sync-pulsen in het signaal. In de ontvanger schijnt een heldere lichtbron door de draaiende schijf in de richting van een scherm. De stroomsterkte naar de lamp wordt geregeld door het binnenkomende videosignaal, zodat de intensiteit van het licht overeenkomstig varieert met de originele helderheidswaarden. Terwijl de schijf draait, projecteert elk gaatje weer één beeldlijn op het scherm. Door de traagheid van het oog worden al lijnen geïnterpreteerd als een volledig beeld.
De nipkow-schijf was cruciaal in de vroegste experimentele televisie van de jaren 1920 - 1930, maar werd snel verdrongen door volledig elektronisch werkende scansystemen. De praktische toepassing van deze uitvinding leverde immers veel problemen op, omdat het moeilijk bleek de nipkow-schijven in zender en ontvanger synchroon te laten lopen. In de onderstaande foto ziet u een moderne replica van een TV-systeem met nipkow-schijven met als inset het beeld dat op het scherm werd geprojecteerd.



Een replica van een TV-systeem met schijven van Nipkow.
(© 2022 Alejandro del Mazo Vivar, edit 2025 Jos Verstraten)

[61] 1886: Heinrich Hertz bevestigt experimenteel de theorie van Maxwell
Heinrich Rudolf Hertz (1857 - 1894) was een Duitse natuurkundige die vooral bekend werd door zijn ontdekking van de radiogolven. Naar hem is de SI-eenheid van frequentie, de hertz, genoemd. Hertz bouwde een toestel dat elektrische vonken kon opwekken tussen twee metalen bollen. Deze vonken creëerden, volgens de theorie van Maxwell, elektromagnetische golven die zich door de lucht verspreidden. Een eindje verder plaatste hij een draad in de vorm van een ring met een kleine opening (een zogenaamde '*vonkenbrug*'). Op het moment dat de vonken werden gegenereerd, ontstond er ook daar een klein vonkje. Dat was het bewijs dat er onzichtbare golven door de lucht gingen. Bij verdere experimenteren stelde hij vast dat die golven reflecteerden, interfereerden en polariseerden, net zoals licht. Hiermee bewees hij dat radiogolven net als lichtgolven elektromagnetisch van aard zijn en bevestigde hij experimenteel de theorie van Maxwell.



Het experiment van Heinrich Hertz. (© Spark Museum)

[62] 1887: Heinrich Hertz ontdekt het foto-elektrisch effect
Tijdens een van zijn experimenten met elektromagnetische golven ontdekte hij in 1887 bij toeval het foto-elektrisch effect. Door een metaal te bestralen met ultraviolet licht kon een elektrische stroom worden opgewekt. Later zou zijn assistent Philipp Lenard een verband zien tussen de frequentie van de gebruikte straling en de grootte van de opgewekte stroom.

[63] 1887: Emile Berliner vindt de grammofoon uit
Emile Berliner (1851 - 1929) was een Duits-Amerikaanse elektrotechnicus en uitvinder. In Amerika ging hij werken bij de Bell Telephone Company. Hij verbeterde Edisons fonograaf. De onhandige fonograaf cilinder verving hij door een platte met was bedekte zinkschijf met een groef in spiraalvorm. De geluidsgolven werden in het zogenoemde berliner-schrift in die groef gemoduleerd. Later verving hij de wasplaat door de schellakplaat, waarmee muziekopnames massaal geproduceerd konden worden. Berliners grammofoon en de methode voor het dupliceren van platen werden uiteindelijk overgenomen door de Victor Talking Machine Company (later RCA). Berliner richtte ook Deutsche Grammophon en het Britse Gramophone Co., Ltd. op om zijn apparaat in Europa op de markt te kunnen brengen.



De grammofoon van Emile Berliner. (© Teylers Museum)

[64] 1891: Johnstone Stoney gebruikt als eerste de naam '*electron*'
George Johnstone Stoney (1826 -1911) was een Ierse natuurkundige. Stoney's belangrijkste wetenschappelijke werk was de voorstelling en de berekening van de grootte van het '*atoom van elektriciteit*' ofwel de fundamentele eenheid van elektrische lading. Hoewel hij reeds in

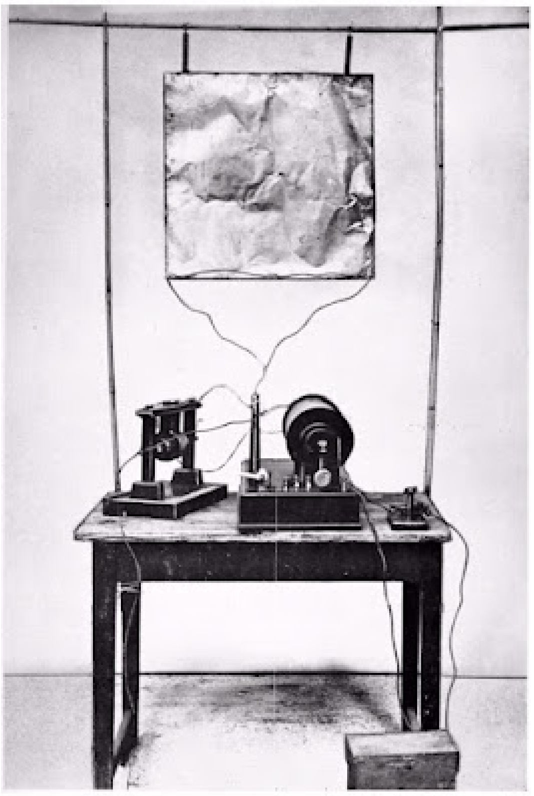
1874 voorstelde hiervoor het begrip '*electron*' te gebruiken was het pas in 1891 dat hij het begrip publiekelijk gebruikte in een publicatie van de Royal Dublin Society. Zijn bijdragen op dit gebied van wetenschappelijk onderzoek legden de basis voor de uiteindelijke ontdekking van het elektron door J. J. Thomson in 1897.

[65] 1893: Nikola Tesla demonstreert het lange-afstand transport van wisselspanning

Nikola Tesla (1856 - 1943) was een uitvinder, elektrotechnicus en natuurkundige. Hij wordt gezien als een van de grootste ingenieurs en uitvinders aller tijden. De tesla (T) is de SI-eenheid van magnetische fluxdichtheid.
In die jaren heerste er in Amerika een verbeten strijd tussen Edison, die van plan was een gelijkspanningsnet aan te leggen en Westinghouse, die geloofde in wisselspanning. Nikola Tesla toonde de haalbaarheid van lange-afstand transport van wisselspanning op de World's Columbian Exposition in Chicago. Hij installeerde daar zijn driefasen-systeem. Er werden meer dan 160.000 gloeilampen opgehangen, gevoed door zijn wisselstroom installatie, waarmee hij aan de 27 miljoen bezoekers van deze wereldtentoonstelling overtuigend liet zien dat wisselspanning zich uitstekend leent voor grootschalige spanningsdistributie.

[66] 1896: Guglielmo Marconi gebruikt de golven van Hertz voor telegrafie

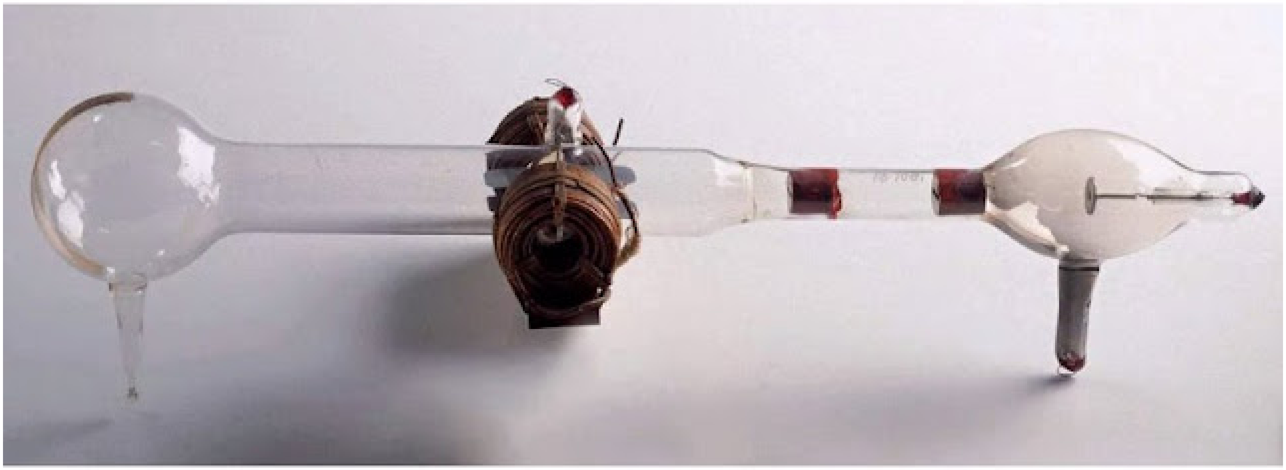
Markies Guglielmo Giovanni Maria Marconi (1874 - 1937) was een Italiaanse natuurkundige, uitvinder en ondernemer. Marconi is vooral bekend door zijn uitvinding van de draadloze telegrafie in 1896. Hij begon rond 1890 te experimenteren met de radiogolven die door Hertz waren aangetoond. Hij slaagde er in om met zelfgebouwde toestellen signalen draadloos te versturen over een afstand van 2,5 km. Hij maakte onder andere gebruik van een vonkgenerator, een verbeterde versie van de coherer (een apparaat om radiogolven waar te nemen) van Branly en zijn eigen uitvinding, de antenne.
Hij emigreerde naar Groot-Brittannië waar hij contact opnam met de hoofdingenieur van de British Post Office die zijn experimenten steunde. Er werden diverse draadloze verbindingen in Groot-Brittannië opgezet. Marconi verkreeg op 2 juni 1896 's werelds eerste octrooi voor een draadloze telegrafiesysteem en richtte in 1897 de Marconi Company op. Het bedrijf werd een pionier op het gebied van draadloze communicatie over lange afstanden en groeide uiteindelijk uit tot een van de succesvolste productiebedrijven van het Verenigd Koninkrijk. Beroemd werden de peperdure HF-meetinstrumenten van dit bedrijf.



De eerste zender van Marconi.
(© 1926 Radio Broadcast Magazine)

[67] 1897: Joseph John Thomson ontdekt het elektron

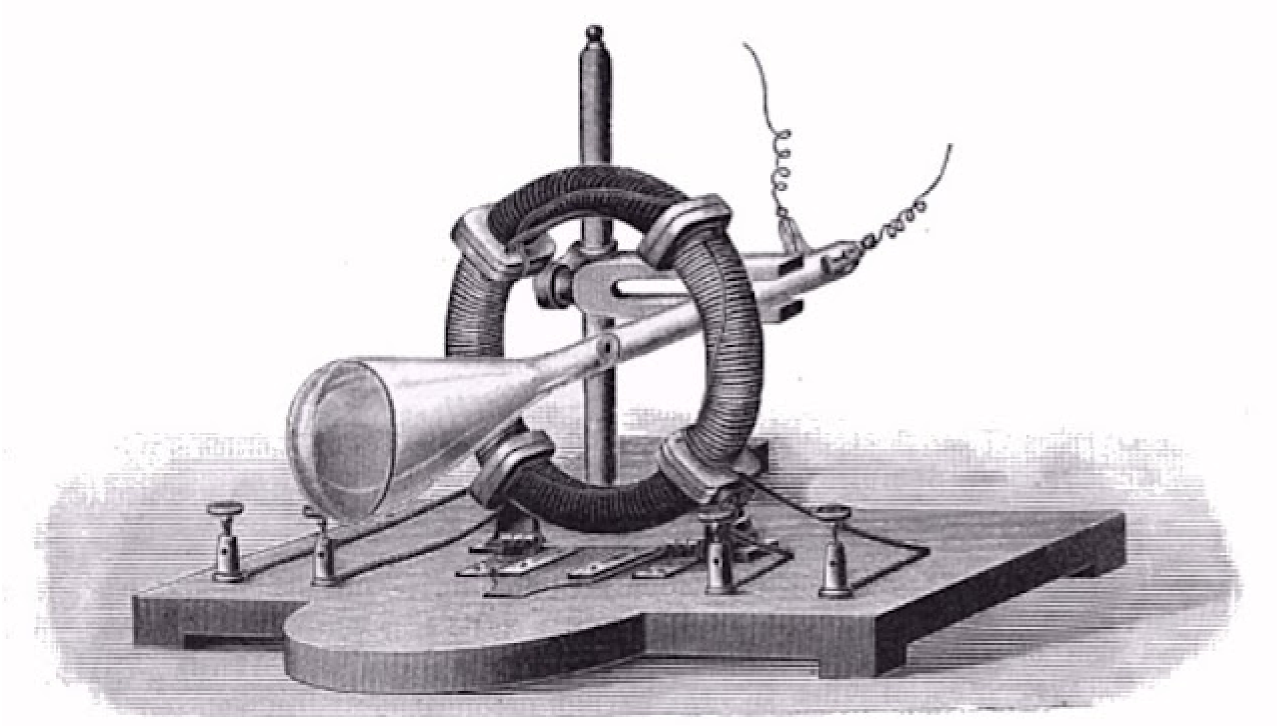
Joseph John Thomson (1856 - 1940) was een Engelse natuurkundige en ontdekker van het elektron, de drager van de elektriciteit. In 1897 voerde Thomson in het Cavendish Laboratory in Cambridge een reeks experimenten uit met zogenoemde kathodestralen, opgewekt in vacuümbuizen. Zo'n buis bevat een kathode en een anode in bijna volledig vacuüm. Als een hoge spanning tussen beide elektroden wordt gezet ontstaan er stralen die van de kathode naar de anode lopen. Deze '*kathodestralen*' worden zichtbaar gemaakt op een fluorescerend scherm achter de anode. Thomson bedacht dat deze stralen uit een stroom van deeltjes moesten bestaan en merkte op dat deze kathodestralen afgebogen konden worden met magnetische en elektrische velden. Door de mate van afbuiging in bekende velden te vergelijken, kon Thomson de verhouding van de lading (e) tot de massa (m) van de deeltjes in de kathodestralen berekenen. Thomson leidde hieruit af dat deze '*kathodestraal-deeltjes*' extreem lichte, negatief geladen bouwstenen van materie moesten zijn. Hij noemde ze aanvankelijk '*corpuscles*', maar later werden ze bekend als elektronen.
Met zijn zeer belangrijke ontdekking toonde hij aan dat atomen wél intern structuur hebben en dus deelbaar zijn.



De kathodestraalbuis die Thomson gebruikte. (© Science Museum London)

[68] 1897: Karl Ferdinand Braun vindt de elektronenstraalbuis uit

Karl Ferdinand Braun (1850 - 1918) was een Duitse natuurkundige. In 1909 won hij de Nobelprijs voor de Natuurkunde voor zijn bijdragen aan de ontwikkelingen van de draadloze telegrafie. Hij deelde de prijs met Guglielmo Marconi. Braun was ook medeoprichter van Telefunken. Zijn elektronenstraalbuis was een verdere ontwikkeling van de vacuümbuizen waarmee Thomson experimenteerde. Hij ontwikkelde in Straatsburg de allereerste elektronenstraalbuis, '*Braunsche Röhre*' genoemd. Met deze Braunsche Röhre kon men voor het eerst elektrische signalen zichtbaar maken op een fluorescerend scherm. Dat markeerde de geboorte van de oscilloscoop en de volledig elektronisch werkende televisie. Behalve de kathode en de anode bevat een elektronenstraalbuis vier afbuigelektroden, waarmee men de elektronenstraal naar iedere gewenste plaats op het scherm kan afbuigen. Die vier elektroden kunnen worden vervangen door een stel spoelen, waardoor de elektronenstraal magnetisch wordt afgebogen. Braun plaatste bovendien een cilindervormige elektrode (later Wehnelt-cylinder genoemd) rondom de kathode om de elektronenbundel te kunnen focusseren op het scherm.



Een van de eerste 'Braunsche Röhre' met twee afbuigspoelen. (© 1899 Müller-Uri)

[69] 1900: Reginald Fessenden vindt de amplitude-modulatie uit

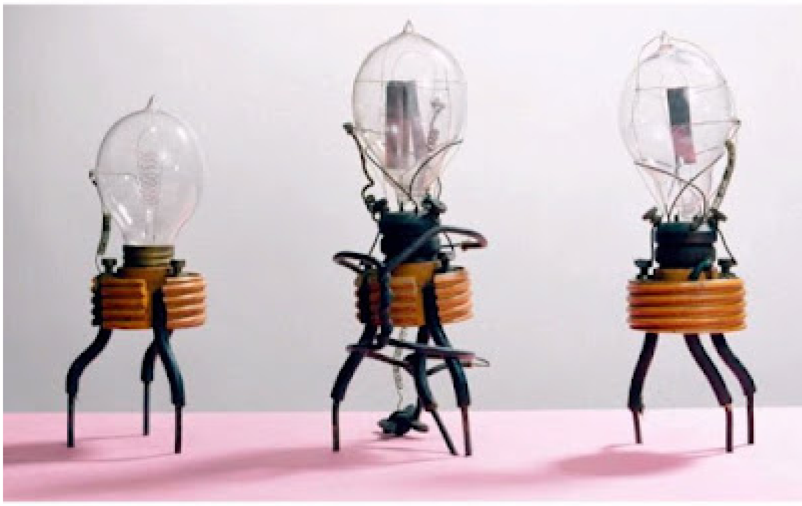
Reginald Aubrey Fessenden (1866 - 1932) was een Canadese ingenieur en uitvinder. Hij wordt gezien als de grondlegger van de moderne radiotechnologie vanwege de door hem ontdekte methode van amplitude-modulatie (AM). Fessenden heeft gewerkt in de fabrieken van Edison en Westinghouse. Hij onderzocht of er met de radiogolven van Hertz een draadloze versie was te ontwikkelen van het bestaande bekabelde telegrafiesysteem van Morse. Hij ontdekte dat dit met de bestaande vonkzenders vrijwel onmogelijk was en kwam tot het inzicht dat voor het uitzenden van spraak een continue periodieke radiogolf noodzakelijk was. Met die radiogolf kon hij menselijke spraak verzenden door de amplitude van de radiogolf te variëren in het ritme van de spraak. Het principe van AM, amplitude-modulatie, was geboren!
Op 23 december 1900 lukte het hem om vanuit zijn werkplaats in Cobb Island de menselijke stem te verzenden over een afstand van 1,6 kilometer. '*One, two, three, four. Is it snowing where you are Mr. Thiessen? If so telegraph back and let me know*' was het bericht dat Fessenden via de radio uitzond. Thiessen gaf antwoord dat het inderdaad sneeuwde.
In die tijd bestonden er echter nog geen elektronische schakelingen die de noodzakelijke periodieke HF wisselspanning konden genereren. Zijn grootste uitdaging betrof dus de ontwikkeling van een zeer snel draaiende generator die zo'n periodieke hoogfrequente draaggolf kon opwekken met een groot zendvermogen. Samen met de Zweedse technicus Ernst Alexanderson slaagde hij in de bouw van een 50 kHz dynamo die de draaggolf leverde voor zijn AM-uitzendingen.

[70] 1901: Peter Cooper Hewitt maakt een kwikdamplamp

Peter Cooper Hewitt (1861 - 1921) was een Amerikaanse elektrotechnicus die in 1901 de kwikdamplamp uitvond, de voorloper van de moderne TL- en spaarlamp. Hij gebruikte een U-vormige vacuüm gezogen buis met aan één uiteinde twee ingesmolten elektrodes. In de buis zat een kleine hoeveelheid vloeibaar kwik. Om de lamp te starten kantelde hij de buis, waardoor het vloeibaar kwik contact maakte tussen de twee elektrodes en er een elektrische boog ontstond. Deze boog verwarmde en verdampte het kwik snel. Zodra er voldoende kwikdamp was gevormd, ging de ontlading over van de vloeistoffase naar de gasfase. In de kwikdamp vormde zich een plasma, waarin de aangeslagen kwikatomen bij terugval naar de grondtoestand blauwgroen licht uitzonden. Later paste hij fluorescerende materialen toe om wat meer rood in het licht te verkrijgen. Omdat een gasontlading een zeer lage elektrische weerstand kan hebben, moest Hewitt een balast toevoegen om de stroom te begrenzen.

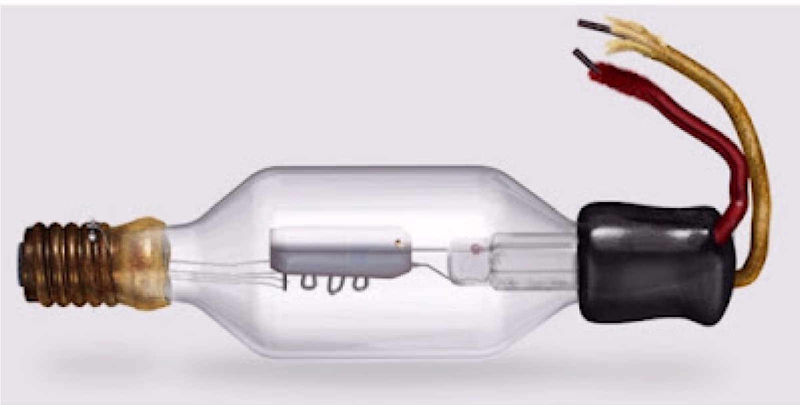
[71] 1901: Guglielmo Marconi verzorgt de eerste trans-atlantische radioverbinding
Op 12 december 1901 slaagde Guglielmo Marconi er voor het eerst in om met een vonkenzender een radiobericht over de Atlantische Oceaan te verzenden. Het morse-teken 'S' (•••) werd vanaf zijn zender in Cornwall (VK) uitgezonden en ontvangen op Newfoundland (USA). Dit luidde een nieuw tijdperk van internationale communicatie in, waarin telegrafiekabels geleidelijk plaats maakten voor draadloze transmissie over lange afstanden.

[72] 1904: John Ambrose Fleming ontwikkelt de vacuüm-diode
John Ambrose Fleming (1849 - 1945) was een Engelse elektrotechnicus en natuurkundige. Hij werd vooral bekend door de uitvinding van de eerste radiobuis waarmee de elektronica een feit werd. De vacuüm-diode van Fleming bestaat uit een luchtdicht afgesloten glazen buis waaruit alle gassen zijn verwijderd, zodat vrij bewegende elektronen niet botsen met gasmoleculen. De kathode is een dunne, elektrisch verwarmde wolfram gloeidraad die bij verhitting thermionisch elektronen (negatief geladen deeltjes) uitzendt. De anode is een metalen plaat die tegenover de gloeidraad is geplaatst. De anode wordt op een positieve spanning van ongeveer 50 V gezet ten opzichte van de kathode. Fleming ontdekte dat er dan een stroom van een paar tientallen mA door de diode gaat vloeien. Als de polariteit van de spanning wordt omgedraaid, dus de anode negatief ten opzichte van de kathode, vloeit er helemaal geen stroom door de diode. De vacuüm-diode is dus een soort van ventiel, dat in slechts één richting elektrische stroom doorlaat.



Een paar van de door Fleming gebouwde vacuüm-diodes.
(© The Board of Trustees of the Science Museum)

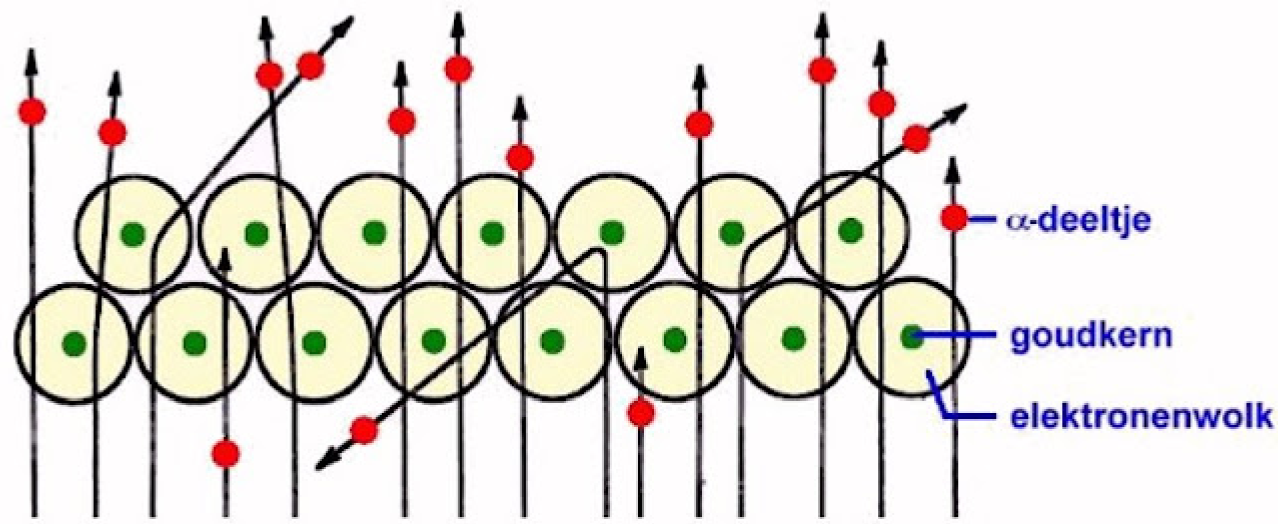
[73] 1906: Lee De Forest vindt de triode uit
Lee De Forest (1873 - 1961) was een Amerikaanse uitvinder op het gebied van de radio- en elektronica-technologie. Hij is het bekendst vanwege zijn uitvinding van de triode. Door een stuurrooster toe te voegen aan de diode-buis ontdekte hij dat zwakke signalen versterkt konden worden. Hij noemde deze buis de '*Audion*'. Tot de uitvinding van de transistor in 1947 zou zijn triode-buis het belangrijkste actieve onderdeel zijn in ieder elektronisch apparaat.



De 'Audion' van Lee De Forest. (© Nationalmaglab)

[74] 1908: Ernest Rutherford voert zijn beroemde strooiingsproef uit

Ernest Rutherford (1871 - 1937) was een Nieuw-Zeelandse/Britse natuurkundige die vooral bekend is geworden door zijn pionierswerk op het gebied van radioactiviteit en de structuur van het atoom. In 1896 werd door Becquerel het verschijnsel van de radioactiviteit ontdekt. Sommige atomen zenden straling uit, die in staat is zorgvuldig tegen licht afgeschermde fotografische platen tóch te belichten. Deze geheimzinnige straling dringt dus blijkbaar zonder enig probleem door een papieren afscherming heen! Eén soort straling, die men α-straling (alpha) noemde, kon gemakkelijk worden gedetecteerd. Men vermoedde dat deze straling uit zware deeltjes bestond die een positieve lading hadden. Om de eigenschappen van deze nieuwe straling te onderzoeken schoot Rutherford een bundel van deze α-deeltjes af op een dunne gouden folie. Hij nam aan dat de meeste deeltjes zouden terugkaatsen, net zoals een bal die tegen een muur wordt geschoten. Tot grote verbazing van Rutherford bleek echter dat de meeste α-deeltjes zonder problemen door de goudfolie heen vlogen! Sommige werden weliswaar afgebogen, waarbij bovendien bleek dat de afbuigingshoeken tamelijk klein waren. Slechts heel weinig α-deeltjes werden volledig teruggekaatst (1 op de 8.000). Uit dit experiment concludeerde Rutherford dat er tussen de atomen vrij veel lege ruimte was, waardoor de meeste α-deeltjes ongehinderd door de folie konden vliegen. Bovendien besloot hij dat de kern van het atoom uit een zeer klein maar hard bolletje moest bestaan.

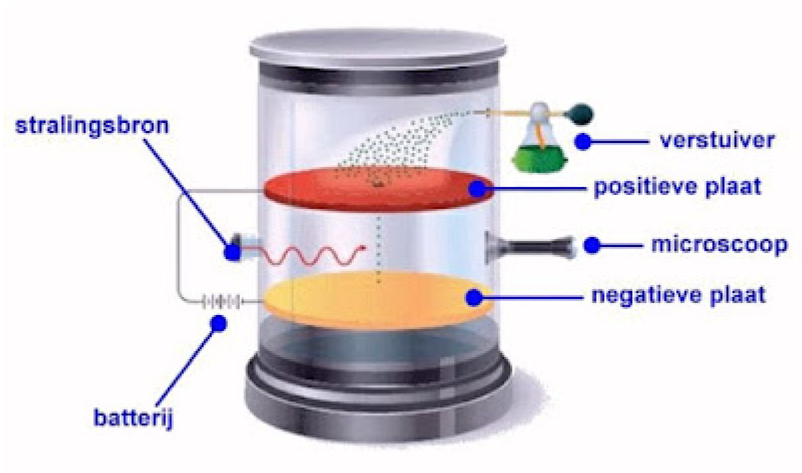


De strooiingsproef van Rutherford. (© 2025 Jos Verstraten)

[75] 1909: Robert Andrews Millikan voert zijn oliedruppel proef uit

Robert Andrews Millikan (1868 - 1953) was een Amerikaanse natuurkundige. Hij won in 1923 de Nobelprijs voor de Natuurkunde. De proef van Millikan staat bekend in de historie van de wetenschap als een klassiek voorbeeld van goede experimentele natuurkunde. De meeste onderzoekers zouden immers onmiddellijk veronderstellen dat het onmogelijk is om zoiets kleins als de fundamentele lading van een elektron te meten en niet eens gaan nadenken over een methode om deze grootheid te meten. Millikan deed dat wél en bedacht een systeem waarmee het, via allerlei omwegen, toch mogelijk bleek het onmeetbare te meten. Aan de hand van onderstaande figuur wordt in het kort uitgelegd hoe Millikan te werk ging. In een vat wordt via een verstuiver olie verstoven tot fijne druppeltjes. Deze druppeltjes vallen uiteraard door hun gewicht naar beneden. Sommige druppeltjes kunnen via een klein gaatje tot het onderste compartiment van het vat doordringen. Dat is opgebouwd uit twee metalen platen, die verbonden worden met de regelbare gelijkspanning van een batterij.
De oliedruppeltjes die tussen de platen komen zullen nog steeds, als gevolg van hun gewicht en de aantrekkingskracht van de aarde, naar de onderste plaat willen vallen. De ruimte tussen de platen wordt bestraald met een sterke bundel röntgenstraling. Deze stralen zullen de luchtatomen tussen de platen in stukken scheuren, waardoor vrije elektronen en positieve ionen ontstaan. De vrije elektronen kunnen zich nu binden aan de oliedruppeltjes. Als een oliedruppeltje een vrij elektron bindt, dan krijgt het een negatieve lading, die uiteraard gelijk is

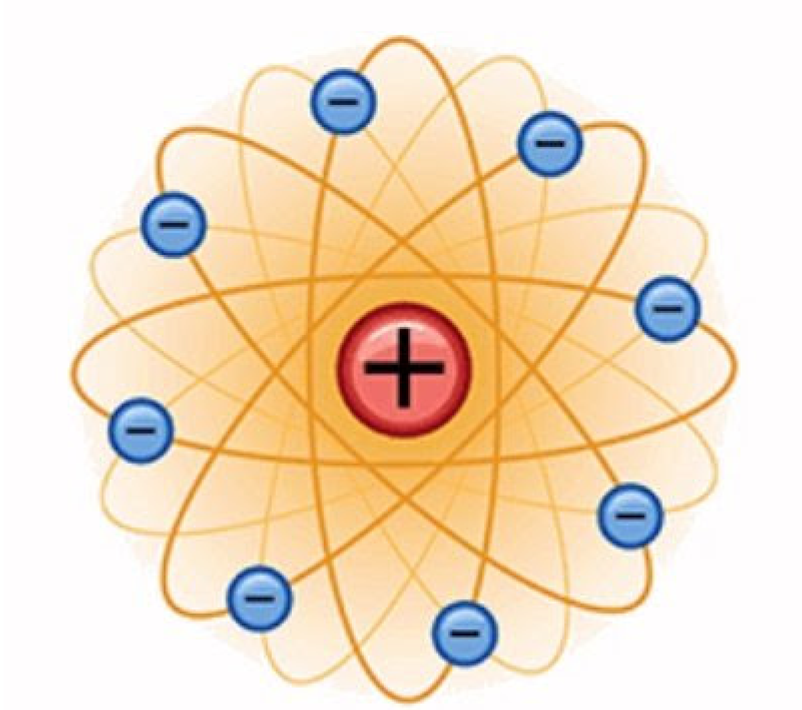
aan de lading van het elektron. Het gevolg is dat het negatief geladen druppeltje wordt aangetrokken door de positieve bovenste plaat.
Er werken nu twee tegengestelde krachten in op het geladen druppeltje. Op de eerste plaats de aantrekkingskracht van de aarde, op de tweede plaats de coulomb-kracht. De spanning tussen de twee platen kan nu zo geregeld worden dat beide krachten even groot zijn en dat de geladen oliedruppeltjes blijven zweven tussen de platen. Dit kan met een microscoop worden waargenomen. Met deze microscoop kan ook de diameter van de druppeltjes worden gemeten. Hieruit kan men het volume berekenen en omdat het soortgelijk gewicht van de olie bekend is, kan men dus het gewicht van een druppeltje bepalen. Uit dit gewicht kan men weer de grootte van de aantrekkingskracht berekenen, die op de druppel wordt uitgeoefend door de aarde. De formule hiervoor werd door Newton opgesteld. Deze kracht is gelijk aan de kracht die door het elektrisch veld tussen de platen wordt uitgeoefend op de geladen druppel. Uit de wet van Coulomb kan men hieruit afleiden hoe groot de lading van de druppel is.
Uiteraard heeft Millikan (en zijn assistenten) dit niet voor één druppeltje gemeten en berekend, maar voor duizenden. Aan de hand van statistische berekeningen kan men dan een gemiddelde waarde berekenen voor de lading van het elektron. De lading van het deeltje was $1{,}60218 \cdot 10^{-19}$ C, de massa werd vastgesteld op het onvoorstelbare $9{,}10939 \cdot 10^{-31}$ kg!
Millikan heeft voor dit zeer ingenieus bedachte experiment in 1923 de Nobelprijs voor natuurkunde gekregen.



Een schets van de opstelling van Millikan.
(© Akron Physics Club)

[76] 1911: Het atoommodel van Rutherford

Uit de waarnemingen die voortvloeiden uit zijn strooiingsproef ontwierp Rutherford een model van het atoom. Hij besloot dat een atoom moest bestaan uit een kleine positief geladen '*pit*' waar, als een soort planeten, zeer kleine negatief geladen deeltjes omheen moesten vliegen. De pit werd de '*kern*' genoemd, de negatief geladen deeltjes de '*elektronen*'. Het aantal elektronen was niet constant, maar afhankelijk van de stof. Dat aantal bepaalde de eigenschappen van de stof, dus waarom bijvoorbeeld ijzer er heel anders uitziet dan koper. De lading van een elektron werd '*de elementaire lading e*' genoemd. Ook dat zou later blijken een van de natuurconstanten te zijn. De kern had een positieve lading die gelijk was aan de totale negatieve lading van alle elektronen. De elektronen bleven in hun baan rond de kern vliegen vanwege de aantrekkingskracht tussen de tegengestelde ladingen van kern en elektronen.
Toch was het, onder bepaalde omstandigheden, mogelijk elektronen van de kern te scheiden. Die elektronen werden '*vrije elektronen*' genoemd, het achterblijvende atoom een '*ion*'. Uiteraard was dit laatste positief geladen.
Het atoommodel van Rutherford was een heel mooi bedenksel, omdat het nogal wat overeenkomsten vertoonde met de samenstelling van het zonnestelsel. Vandaar dat het atoommodel van Rutherford '*planetair*' werd genoemd en vrijwel onmiddellijk door de meeste wetenschappers werd overgenomen.



Het atoommodel van Rutherford. (© examenoverzicht.nl)

[77] 1911: Heike Kamerlingh Onnes ontdekt supergeleiding
Heike Kamerlingh Onnes (1853 - 1926) was een Nederlandse natuurkundige, winnaar van de Nobelprijs voor Natuurkunde en hoogleraar aan de Universiteit van Leiden. Zijn onderzoeksgebied was dat van de fysica van de gecondenseerde materie, waarin hij in 1911 het verschijnsel van de supergeleiding ontdekte. Onnes richtte in 1908 ’s werelds eerste laboratorium voor koude technologie op. Hij slaagde er datzelfde jaar in om helium vloeibaar te maken bij een temperatuur van -269 °C ofwel 4,2 °K. Met zijn vloeibare helium koelde hij kwik stapsgewijs af. Hij gebruikte een nauwkeurige weerstandsmeter (Wheatstonebrug met gevoelige galvanometer) om de elektrische weerstand van de proefstukken te meten. Terwijl hij kwik afkoelde van 4,2 °K naar nog lagere temperaturen, zag hij plotseling de weerstand dalen. Onder de kritische temperatuur van 4,15 °K viel de weerstand van het kwik terug naar praktisch nul ohm. Hij noemde de nieuwe toestand '*supergeleiding*' en besprak in latere studies deze kritische temperatuur en het onderscheid met de gewone geleiding.

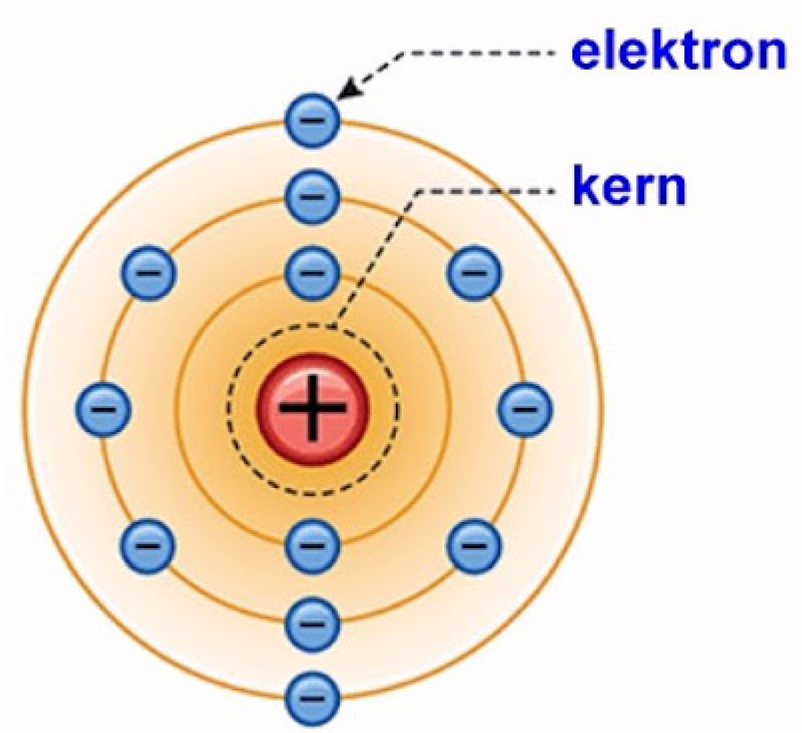
[78] 1913: Niels Bohr ontwikkelt het bohr-model van het atoom
Niels Henrik David Bohr (1885 - 1962) was een Deense theoretisch natuurkundige en scheikundige. In 1922 ontving hij de Nobelprijs voor Natuurkunde. Bohr had in zijn studietijd samengewerkt met Thomson en met Rutherford en kende de bestaande atoommodellen dus als de inhoud van zijn broekzak. Maar hij was ook goed op de hoogte van de problemen rond deze modellen. Bohr stelde nu een nieuw atoommodel samen, dat in feite mooi aansloot op het planetair model van Rutherford, maar een verklaring gaf voor de stationaire banen van de elektronen. Bohr stelde:

- Elektronen kunnen alleen op welbepaalde banen (schillen) rond de kern draaien. Door gebruik te maken van bepaalde stellingen van de quantummechanica van Max Planck kon Bohr zelfs de stralen van deze banen berekenen. En dat was wél nieuw, want daarmee was de vraag naar het waarom van de waargenomen elektronenschillen opgelost.
- In strijd met alles wat de elektromagnetische theorie van Maxwell beweert zenden de elektronen op deze banen géén energie uit. Bohr loste deze tegenstelling op door te beweren dat de traditionele elektromagnetische theorie niet van toepassing is in de kleine-schaal structuur van een atoom. De elektronen kunnen dus tot in de eeuwigheid rustig doorgaan met op deze banen te draaien, omdat dit stationaire toestanden voor het atoom zijn. Deze stationaire schillen noemt men de '*bohr-banen*' van de elektronen.

Elektronen zullen dus bij voorkeur een plekje op een van de bohr-banen opzoeken, omdat dit de meest stabiele toestand van het atoom is.

- Iedere baan of schil komt overeen met een welbepaalde rustenergie van de elektronen. Deze energie hangt af van de afstand tussen de kern en de schil. Als er extra energie aan het atoom wordt toegevoegd, bijvoorbeeld door het op te warmen of aan een sterk elektrisch veld bloot te stellen, kunnen elektronen deze energie absorberen. Zij zijn dan in staat naar een baan of schil te springen die een hogere rustenergie heeft. Voorwaarde is dan wel dat er voldoende energie aan het atoom is aangeboden om het verschil in rustenergie tussen beide schillen te overwinnen. Een elektron dat door toevoeging van extra energie zijn stationaire bohr-baan verlaten heeft noemt men een '*aangeslagen*' elektron.
- Op dat moment verkeert het atoom in een instabiele toestand. Het aangeslagen elektron zal zo snel mogelijk terug vallen naar zijn stationaire bohr-baan. Hierbij zendt het elektron echter weer een hoeveelheid energie uit onder de vorm van elektromagnetische straling. De uitgezonden hoeveelheid energie is gelijk aan het verschil in rustenergie tussen beide schillen. De overgang van een elektron van aangeslagen toestand naar stationaire bohr-toestand noemt men een 'quantumsprong'.

Dit atoommodel staat aan de basis van een heleboel elektronica ontwikkelingen, zoals de LED en de LASER.



Het atoommodel van Bohr. (© examenoverzicht.nl)

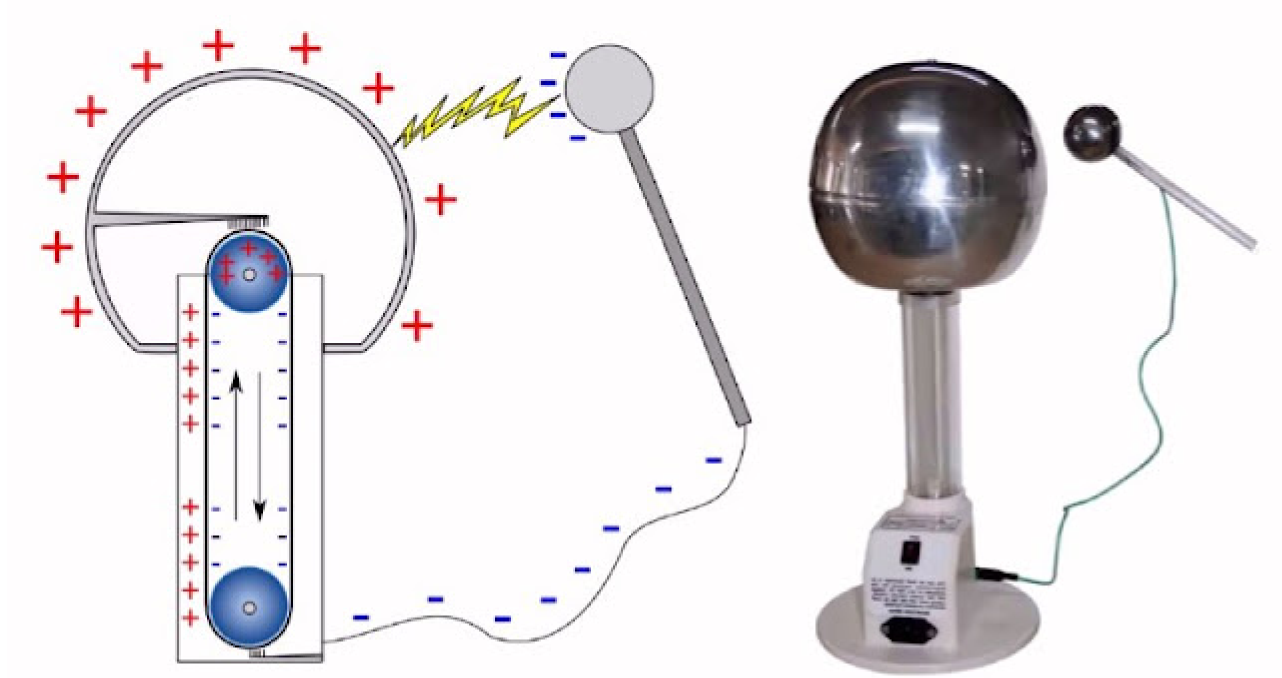
[79] 1926: John Logie Baird laat het publiek de '*Televisor*' zien

John Logie Baird (1888 - 1946) was een Schotse ingenieur. Zijn belangrijkste uitvinding was een van de eerste werkende televisie-ontvangers voor het grote publiek. Voor zijn televisie maakte hij uiteraard gebruik van een nipkow-schijf. Zijn apparaat, dat hij '*Televisor*' noemde, was gemaakt van alledaagse voorwerpen en dus gemakkelijk na te bouwen. In januari 1926 hield hij de eerste publieke demonstratie van zijn televisie voor de Royal Institution en in het warenhuis Selfridge's in Oxford Street, Londen. Hij verzond een goed herkenbaar beeld van een pop. Na deze demonstratie kreeg hij geldelijke steun voor zijn onderzoek, waarna hij de '*Baird Televisor Development Company*' oprichtte. In 1927 bracht hij een beeld over van Londen naar Glasgow, en in 1928 trans-atlantisch van Londen naar New York. Zijn televisie brak echter niet écht door naar het grote publiek, omdat de nipkow-schijf in de praktijk vrij onbetrouwbaar werkte.



De 'Televisor' van Baird. (© Science Photo Lib)

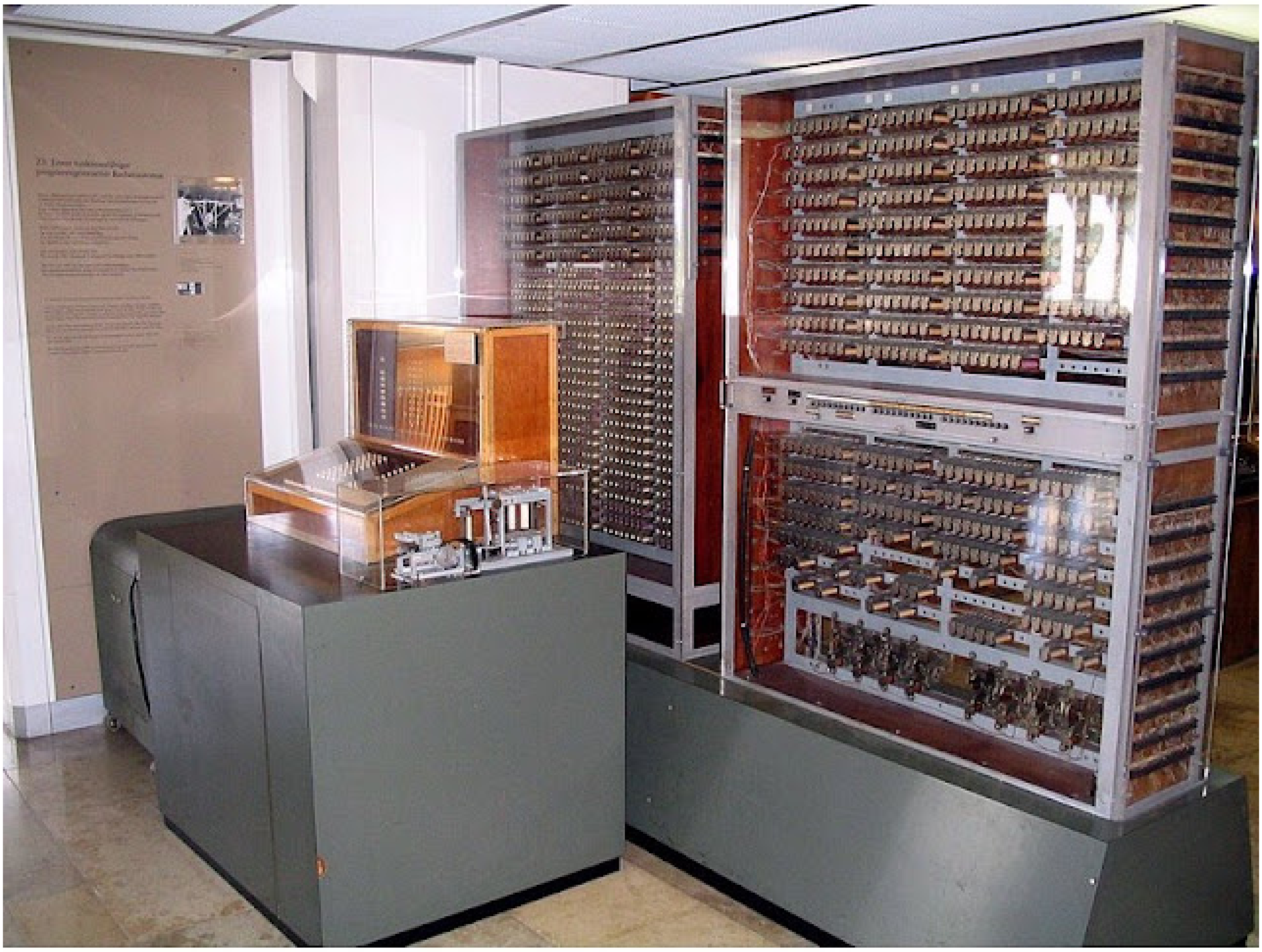
[80] 1929: Van de Graaff vindt zijn '*vandegraaff-generator*' uit
Robert Jemison Van de Graaff (1901 - 1967) was een Amerikaanse natuurkundige, instrumentmaker en hoogleraar in de natuurkunde aan de Princeton-universiteit. Hij is vooral bekend door zijn uitvinding van een elektrostatische deeltjesversneller, de '*vandegraaff-generator*'. Die werkte in principe op precies dezelfde manier als de allereerste elektriseermachines, maar er konden spanningen tot meer dan een miljoen volt mee worden opgewekt. Het apparaat bestaat uit een eindeloze band uit katoen, die aan de boven- en onderzijde wordt afgeschraapt met metalen kammen. De wrijving tussen de band en de metalen kammen zorgt voor een oplading van de band. De negatieve lading wordt afgevoerd naar de aarde via de onderste metalen kam. De positieve lading wordt overgebracht naar een grote metalen bol aan de bovenzijde van de generator.
De bol aan de bovenzijde kan opgevat worden als een hele grote leidse fles, waarin heel wat lading verzameld kan worden. Met de allereerste vandegraaff-generatoren was men in staat miniatuur bliksems te maken.
Vandegraaff-generatoren worden in het moderne wetenschappelijke onderzoek nog steeds gebruikt. Men is nu in staat spanningen van tientallen miljoenen volt op te wekken, spanningen die gebruikt worden om ionenstromen uit atomen te genereren en deze (zware) ionen te laten botsen met atomen. Ondanks alle moderne snufjes werken deze apparaten nog steeds dankzij een eindeloze band, die door een elektromotor wordt rondgedraaid.



Werkingsprincipe en commercieel model (€ 200,00) van de vandegraaff-generator.
(© 2025 Jos Verstraten)

[81] 1939: Russell Ohl ontdekt bij toeval de PN-overgang in silicium
Russell Shoemaker Ohl (1898 - 1987) was een Amerikaanse natuurkundige. Hij was de eerste wetenschapper die gedegen onderzoek deed naar halfgeleiders, onderzoek dat uiteindelijk zou leiden tot de uitvinding van de transistor. Hij werkte bij de Bell Laboratories en deed onderzoek naar hoogfrequente radio-ontvangst. Hij wilde de grote vacuümbuizen, die toen gangbaar waren in radio's, vervangen door halfgeleider materialen. Tijdens zijn onderzoek ontdekt hij in 1939 bij toeval de PN-overgang in een siliciumkristal. Hij ontdekte dat in een silicium kristal spontaan een klein stroompje werd opgewekt als hij het silicium met een gloeilamp bescheen. De oorzaak van dit fenomeen bleek een barst in het siliciumkristal te zijn. De elektronen bewogen bij de barst niet kriskras door elkaar, zoals in de rest van het materiaal, maar allemaal in dezelfde richting. Er was dus spontaan een PN-overgang ontstaan in dit kristal. Deze ontdekking zou leiden tot de ontwikkeling van de transistor in 1947.

[82] 1941: Konrad Zuse bouwt de eerste elektronische computer
Konrad Zuse (1910 - 1995) was een Duitse computerpionier die de eerste computer ter wereld bouwde. Zijn Z3 computer bevatte 2.600 elektromechanische relais waarvan 1.400 voor het geheugen en circa 600 voor de rekenunit. Elk bit werd door een relais gerepresenteerd. De kloksnelheid bedroeg tussen 5 en 10 Hz, wat betekende dat een optelling ongeveer 0,8 seconde en een vermenigvuldiging ongeveer 3 seconde duurden. Het apparaat kon optellen, aftrekken, vermenigvuldigen, delen en vierkantsworteltrekken. Daarnaast kon het operaties voor input/output en geheugen laden/opslaan/uitlezen uitvoeren. De Z3 werd geprogrammeerd met geponste celluloidfilm.
De originele Z3 computer werd op 21 december 1943 door een geallieerd bombardement vernietigd. Omdat dit apparaat werd gebouwd tijdens het nazi-regime in Duitsland werd deze uitvinding na de oorlog lang doodgezwegen en werd ontkend dat de eerste computer een Duitse vinding was.

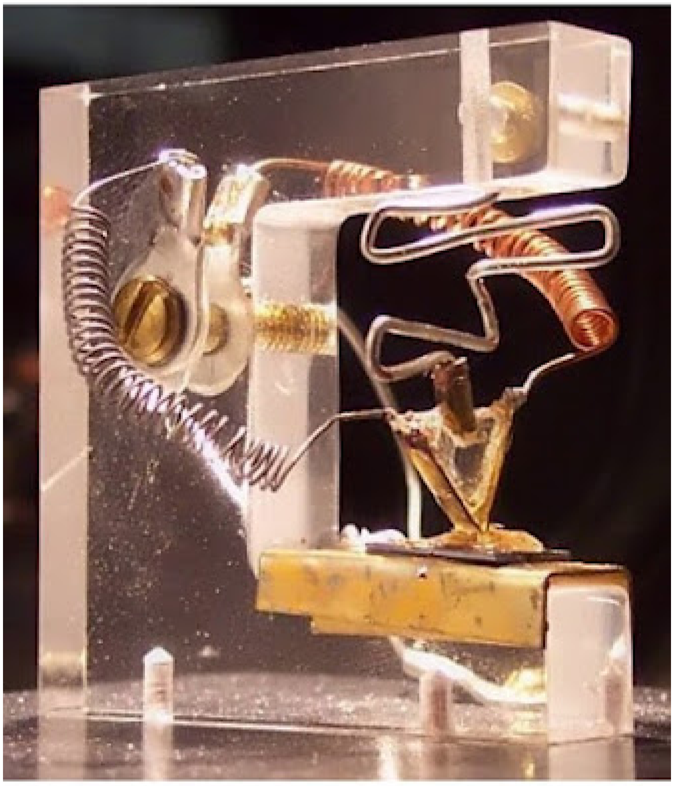


Een replica van de Z3 computer van Konrad Zuse. (© Deutsches Museum Munchen)

[83] 1947: Bardeen, Shockley en Brattain ontwerpen de transistor

Voor deze prestatie ontvingen zij in 1956 de Nobelprijs voor Natuurkunde. De uitvinding van de transistor wordt vaak gezien als een van de belangrijkste technologische doorbraken van de 20e eeuw, die leidde tot de opkomst van Silicon Valley en de hedendaagse informatietechnologie.

De allereerste werkende transistor was een puntcontact transistor, ontwikkeld door Bardeen en Brattain onder leiding van Shockley bij Bell Telephone Laboratories in New Jersey. Het experiment vond plaats op 16 december 1947. De eerste transistor was gemaakt van een blokje germanium met twee zeer dicht bij elkaar geplaatste gouden contactpunten die door een veer tegen het oppervlak werden aangedrukt. Men injecteerde een kleine stroom via één goudcontact (de emitter), waardoor gaten in het germanium ontstonden. Deze beïnvloedden de stroom tussen het tweede contact (de collector) en de basisplaat, waardoor een kleine wijziging in de emitterstroom resulteert in een grotere verandering in de collectorstroom. Zo werd versterking bereikt, hoewel de versterkingfactor β van deze transistor maar ongeveer 2 tot 3 bedroeg.



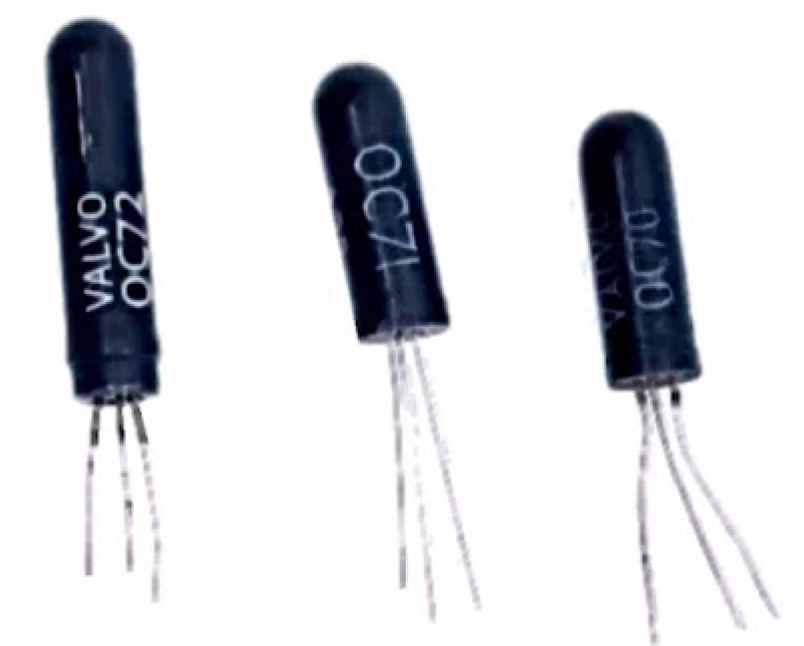
Replica van de eerste transistor. (© 2004 Stahlkocher)

[84] 1954: Calvin Fuller en Gerald Pearson maken de eerste zonnecel

Deze wetenschappers, werkzaam bij Bell Telephone, ontdekten hoe door gecontroleerde toevoeging van elementen in silicium een PN-overgang wordt gecreëerd die een elektrisch veld genereert. Dit veld scheidt de door invallende fotonen gecreëerde elektronen en gaten, zodat er een stroom kan lopen. Om te voorkomen dat veel licht wordt weerkaatst, brachten ze een dunne, fosforhoudende laag op het silicium aan. Deze anti-reflectielaag zorgde ervoor dat méér zonlicht in de cel kon doordringen. Door heel fijne metalen kontaktbruggetjes op het siliciumoppervlak aan te brengen, wisten ze de opgewekte stroom uit de cel te halen zonder het lichtoppervlak nodeloos te bedekken. De eerste zonnecel had een oppervlak van enkele vierkante centimeter en leverde genoeg stroom om een elektrische klok te laten werken.

[85] 1954: De OCxx transistoren worden door Philips op de markt gebracht

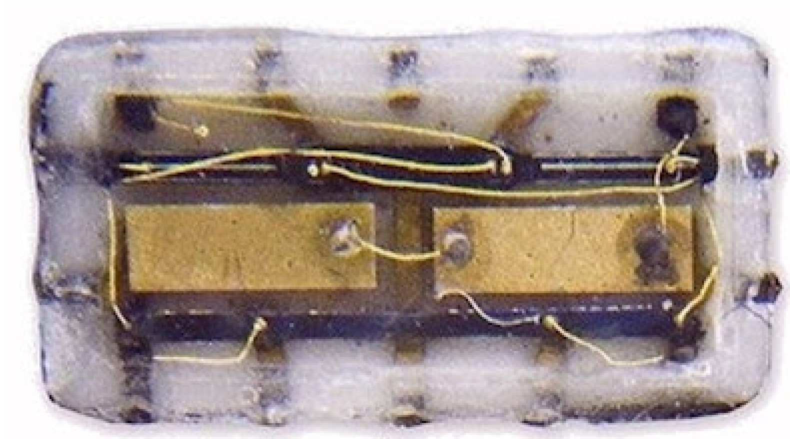
De allereerste transistoren die voor de hobbyist beschikbaar kwamen waren de OC50 en OC51 van Mullard-Valvo-Philips. De codering gaat nog terug tot de codering die men van buizen was gewend. De 'O' verwees naar de term koude kathode, de 'C' stond voor triode.
Nadien werden de OC70, OC71 en OC72 geïntroduceerd als de eerste audio-frequente transistoren in glasbehuizing die in massa werden geproduceerd en in ontelbare nabouwbeschrijvingen in de hobby-tijdschriften werden toegepast.
Deze transistoren zijn nu verzamelaarsobjecten geworden. Voor de onderstaande set moet u op Ebay $ 39,00 neertellen!



De originele OC70, OC71 en OC72 transistoren. (© Ebay)

[86] 1958: Jack Kilby ontwikkelt een methode om IC's te maken

Jack St. Clair Kilby (1923 - 2005) was een Amerikaanse natuurkundige, uitvinder van de geïntegreerde schakeling en Nobelprijswinnaar. Kilby werkte bij Texas Instruments en kreeg een opdracht van het Amerikaanse leger. Hij moest een kleine module ontwikkelen waarin zo min mogelijk gesoldeerd moest worden. Kilby bekeek of hij dit met een zes jaar oud idee van de Brit Geoffrey Dummer, waar nog nooit iets mee gedaan was, kon realiseren. Op een plak germanium wist hij alle elektronische componenten te creëren. Op 12 september 1958 presenteerde Kilby zijn vinding intern en in het voorjaar van 1959 aan het publiek.

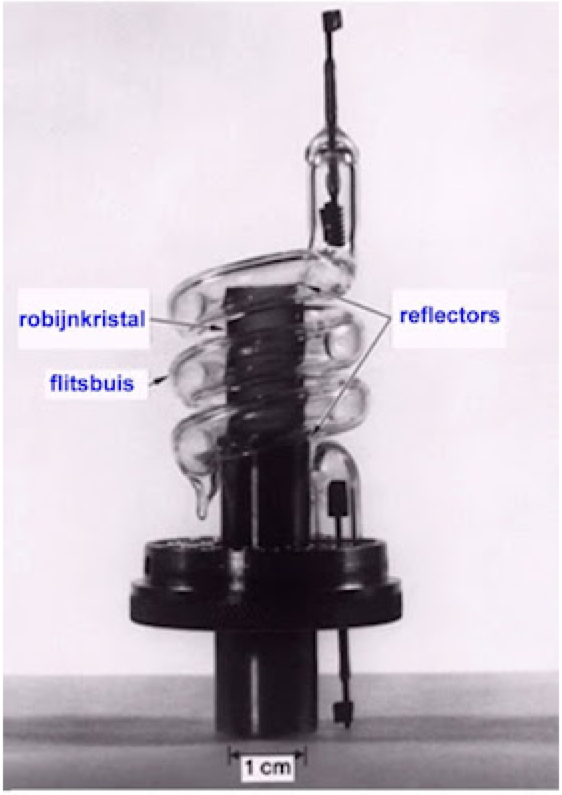


De eerste geïntegreerde schakeling van Kilby.
(© Computer History Museum)

[87] 1960: Theodore Harold Maiman ontwerpt de eerste laser

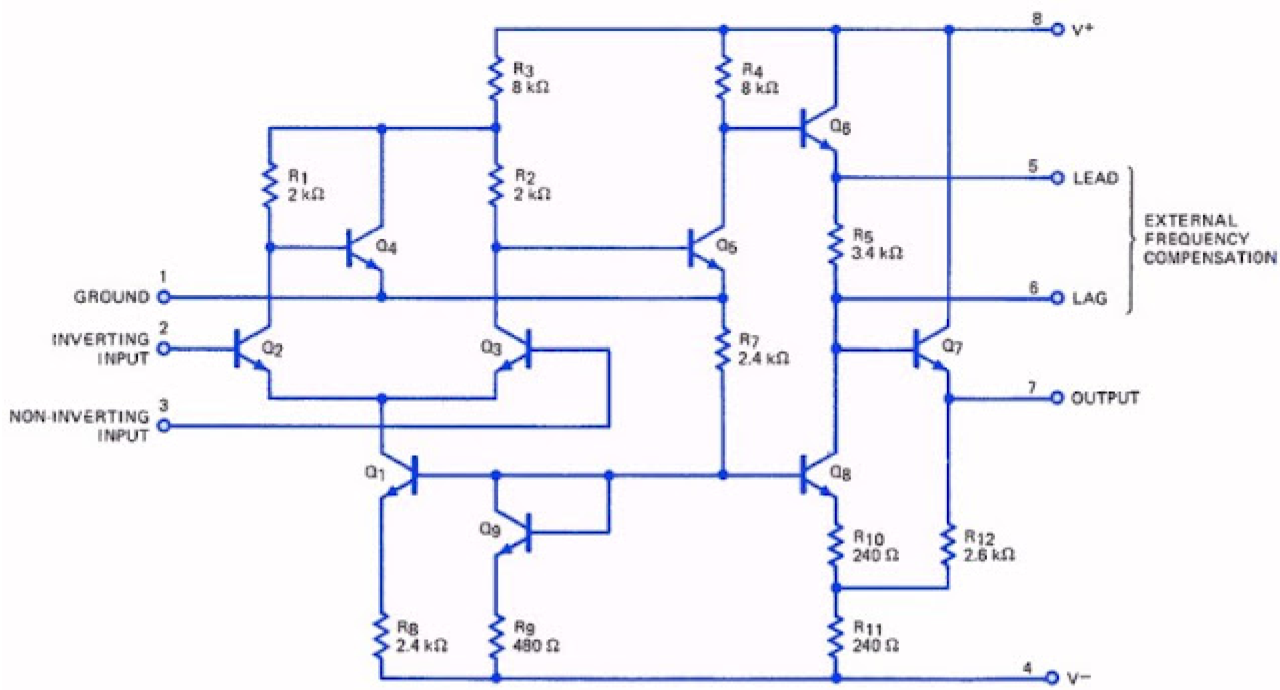
Theodore Harold Maiman (1927 - 2007) was een Amerikaanse natuurkundige en elektrotechnicus. In 1960 construeerde hij de allereerste robijnlaser. Deze bestond uit een synthetisch robijnkristal Al_2O_3, gedoteerd met Cr^{3+}-ionen, in de vorm van een gepolijste cilinder. In dit kristal vond de lasergeneratie plaats bij een karakteristieke golflengte van 694,3 nm, waardoor de robijnlaser felrood licht uitzond. Om de Cr^{3+}-ionen in het robijnkristal in een hogere energietoestand te brengen, omringde Maiman de cilinder met een xenon flitslamp. Deze genereerde intense, korte flitsen die een groot aantal elektronen van de grondtoestand naar een hoger energieniveau verplaatsten. Die geëxiteerde elektronen vervielen in een aantal stadia weer terug naar de bohr-toestand, waarbij een foton werd uitgezonden. Dit foton kon vervolgens een ander geëxiteerd elektron laten vervallen. Hierbij ontstonden twee

fotonen die volledig in fase en dezelfde richting en golflengte hadden. Dit leidde tot een lawine-effect binnen het kristal.
Beide uiteinden van de robijncilinder waren voorzien van verzilvering. Één uiteinde was bijna volledig reflecterend, het andere uiteinde was gedeeltelijk reflecterend, zodat er een bundel licht van hoge intensiteit uit kon treden. Door het herhaaldelijk heen en weer kaatsen van steeds meer fotonen tussen deze spiegels nam de intensiteit exponentieel toe, waarna een deel door het gedeeltelijk reflecterende uiteinde ontsnapte als een korte, krachtige laserpuls.



De eerste laser van Theodore Harold Maiman.
(© Jeff Hecht)

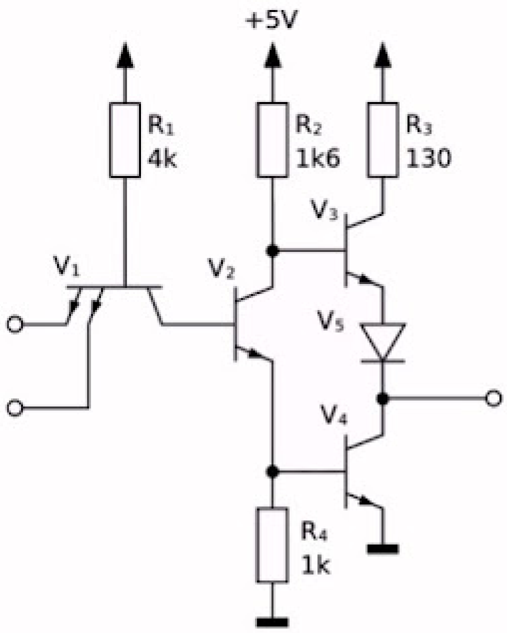
[88] 1963: Fairchild Semiconductor brengt de eerste op-amp µA702 uit
De µA702 geldt als de allereerste commercieel verkrijgbare monolithische operationele versterker. Met dit ontwerp legde Fairchild de basis voor de massaproductie van analoge geïntegreerde schakelingen en luidde het een nieuw tijdperk in de elektronica in. De µA702 was een monolithische DC-versterker, vervaardigd met het planar-epitaxiale proces. Hij werd geleverd in een metalen TO-99 behuizing en was bedoeld voor toepassingen in analoge computers en precisie-instrumentatie. De µA702 bevatte negen bipolaire transistoren, verdeeld over een differentiële versterker aan de ingang en een klasse-A uitgangsversterker. De bandbreedte werd gespecificeerd als 20 MHz, een externe compensatiecapaciteit voor stabiliteit bij hogere frequenties was wél noodzakelijk. Al in 1965 volgde zijn opvolger, de µA709, die hogere versterking, betere input/output-spanningsbereiken en lagere biasstromen bood. In 1968 kwam de µA741, met interne frequentiecompensatie, die uitgroeide tot de meest gebruikte op-amp in de elektronica.



Het intern schema van de µA702. (© Fairchild Semiconductor)

[89] 1966: Texas Instruments introduceert de 7400 TTL-serie

Met de introductie van de TTL-logica veroorzaakte Texas Instruments een nieuwe revolutie. TTL staat voor '*Transistor Transistor Logic*', een systeem dat gebruikmaakt van bipolaire transistoren om logische schakelingen samen te stellen, zoals AND, OR, NOT, NAND, NOR, enz. Voor het eerst werd het voor iedere elektronicus mogelijk ingewikkelde digitale schakelingen te ontwerpen zonder de noodzaak honderden losse transistoren in een print te solderen. Poorten, flip-flop's, tellers, schuifregisters: alles stond ter beschikking in 14- of 16-polige goedkope IC'tjes die zonder problemen de meest ingewikkelde binaire bewerkingen uitvoerden. De oorspronkelijke TTL-familie werkte op een voedingsspanning van slechts 5,0 V. De chip's zaten in een goedkope plastic in plaats van in een keramische behuizing, zoals de vorige series IC's.
Dank zij deze IC's kon iedere hobby-elektronicus zijn/haar vriendenkring overbluffen met het showen van een zélf in elkaar gesoldeerde digitale klok! De oorspronkelijke serie wordt vandaag de dag nog nauwelijks gebruikt. De vroege thuis- en personal computers van de jaren 1970 en 1980 bevatten echter een groot aantal van deze chips.



De basisschakeling van de TTL-logica.
(© Texas Instruments)

[90] 1969: Marcian Edward Hoff vindt de microprocessor uit

Marcian Edward (Ted) Hoff (1937 - ....) is een Amerikaanse elektrotechnicus en een van de uitvinders van de microprocessor. Hij werkte bij het net opgerichte Intel als elektrotechnisch ingenieur. In 1968 kreeg hij de taak om een geïntegreerde schakeling te ontwerpen voor Busicom, een Japanese fabrikant van zakrekenmachines. De oplossing die Hoff verzon was voor die tijd revolutionair. In plaats van een chip te maken met een vast ingebakken structuur, uniek voor een bepaalde toepassing, bedacht hij een universele microchip die achteraf te programmeren was: de microprocessor.

[91] 1971: Intel introduceert de 4004 als eerste microprocessor

De door Hoff geïntroduceerde schakeling werd verder ontwikkeld, mede door zijn collega's Federico Faggin, Stanley Mazor en Masatoshi Shima. In 1971 kwam Intel met de eerste commercieel beschikbare miicroprocessor op de markt: de 4004. Deze microprocessor had de volgende eigenschappen:

- Architectuur: 4 bit
- Kloksnelheid: 740 kHz
- Aantal transistoren: 2.300
- Instructieset: 46 instructies
- Databus breedte: 4 bit
- Adresbus breedte: 12 bit
- Registers: 16 algemene registers van elk 4 bit
- Productietechnologie: 10 μm silicon-gate PMOS
- Verwerkingscapaciteit: ongeveer 92.000 instructies per seconde

[92] 1973: Motorola introduceert de eerste mobiele telefoon

Begin jaren zeventig werd Martin Cooper door Motorola aan het hoofd gezet van de autotelefoon divisie. Cooper voorzag een toekomst waarin mobiele telefoons niet alleen in auto's toepasbaar waren, maar zo klein en licht werden dat ze door iedereen op straat gebruikt konden worden. Na veel onderzoek en ontwikkeling kon Cooper in 1973 de eerste draagbare mobiele telefoon bouwen en testen. Deze DynaTAC-telefoon kostte toen wel een fortuin, ongeveer net zoveel als een kleine auto.

[93] 1977: De Apple II komt op de markt

De Apple II was de eerste succesvolle personal computer en werd ontwikkeld door Steve Wozniak en Steve Jobs. De Apple II speelde een grote rol in het populair maken van de computer voor thuis- en kantoorgebruik. Enkele kenmerken van de Apple II:

- Processor: MOS Technology 6502 op 1 MHz
- RAM: 4 kB uitbreidbaar tot 48 kB
- Opslag: cassettebandjes, later diskettes met de Disk II drive
- Beeldscherm: tekst en kleurengrafiek, voor die tijd uniek!
- Besturingssysteem: Apple DOS (vanaf 1978)
- Prijs bij lancering: rond de $ 1,298 (met 4 KB RAM)



De Apple II basisset. (© 2019 FozzTexx)

[94] 1981: IBM brengt de eerste PC op de markt

De trend naar persoonlijke computers was in gang gezet met de Altair 8800 en uiteraard met de Apple II. De naam '*Personal Computer*' werd echter eerst écht gangbaar toen IBM in 1981 zijn eerste kleine goedkope computer voor persoonlijk gebruik, Model 5150, op de markt zette. Het succes van de PC was vooral te danken aan zijn modulaire opbouw en de openbaar gemaakte ISA-bus. Die bestond uit een reeks connectoren op het moederbord van de PC waarin uitbreidingskaarten konden worden geprikt. Op die manier werd het voor andere bedrijven mogelijk speciale onderdelen voor de IBM-PC aan te bieden en later zelfs zogenaamde complete klonen. Er ontstond een ware stortvloed aan uitbreidingen voor de PC: betere grafische kaarten, geluidskaarten, geheugenuitbreidingen, allerlei soorten meetkaarten, communicatie-interfaces, etc. Het duurde maar een paar jaar voordat vrijwel niemand in de zakelijke wereld zonder een PC, MS-DOS, WordPerfect en Lotus 1-2-3 kon.
Model 5150 had de onderstaande specificaties:

- Processor: Intel 8088
- Kloksnelheid: 4,77 MHz
- Geheugen: 16 kB standaard, uitbreidbaar tot 640 kB
- Opslag: één of twee 5.25" floppy drives
- Besturingssysteem: PC-DOS 1.0
- Video: Monochrome Display Adapter of Color Graphics Adapter
- Geluid: enkel interne speaker met pieptoon
- Prijs: ongeveer $ 1,565, zonder monitor
- Uitbreidingssloten: 5 ISA-slots

[95] 1982: Philips en Sony introduceren de audio-CD

Eind jaren ’70 begonnen Philips en Sony onafhankelijk van elkaar aan de ontwikkeling van een optische schijf waarop muziek kon worden opgeslagen. In 1979 besloten ze hun krachten te bundelen om tot een wereldwijde standaard te komen. Uit de combinatie van Sony’s ervaring met digitale audio en Philips’ ervaring met optische opslag (Laserdisc) ontstond een nieuwe, wereldwijd erkende standaard voor de digitale opslag van audio op een optische schijf: de audio Compact Disk.
De audio-CD had een diameter van 12 cm en kon ongeveer 74 minuten audio bevatten. Die 74 minuten kwamen deels door het streven om Beethoven's 9e symfonie in z’n geheel op één CD te krijgen. Het geluid werd digitaal opgeslagen in stereo met een samplingfrequentie van 44,1 kHz en met 2x16 bit resolutie. De audio-CD werd al snel populair dankzij de betere

geluidskwaliteit, de duurzaamheid en het gebruiksgemak en werd in de jaren ’90 het dominante formaat voor muziek.
Op 1 oktober 1982 maakte de wereld voor het eerst kennis met de CD-speler. Sony had met de CDP-101 de primeur, Philips volgde ongeveer een maand later met de lancering van de CD100.



De eerste audio-CD speler van Sony. (© 2012 Alessandro Nassiri)

[96] 1984: Apple introduceert de Macintosh 128k

Onder de leiding van Jef Raskin startte Apple in 1981 met een project voor het ontwikkelen van een betaalbare, gebruiksvriendelijke personal computer. Steve Jobs sloot zich hierbij later aan en wilde absoluut dat deze computer over een grafische gebruikersinterface (GUI) zou beschikken, te bedienen met een muis. Een gouden ingeving! Op 24 januari 1984 werd de originele Macintosh 128K geïntroduceerd. Hij had een ingebouwd negen inch beeldscherm, werd bediend met een muis en had 128 kB RAM-geheugen. De grafische gebruikersinterface deed de IBM PC met zijn MS-DOS opeens middeleeuws lijken. Deze PC werkte met een 7,8336 MHz Motorola 68000 processor en een speciale grafische chip. Het opstarten gebeurde vanaf een 64 kB ROM-chip, deze bevatte de opstartprocedure en wat extra systeemroutines. De Macintosh 128k had een enkelzijdig 3,5 inch diskettestation met ondersteuning voor 400 kB diskettes. Om de PC op te starten was het nodig de '*Startup Disk*' te laden. Deze kon na het opstarten verwijderd worden, zodat er een data-diskette geplaatst kon worden.



De Macintosh 128k van Apple. (© 1984 Apple Inc.)

[97] 1995: De DVD standaard wordt opgesteld

Begin jaren '90 zochten de grote elektronica-concerns naar een opvolger voor de VHS-videoband op een optische schijf. Om een format-oorlog te vermijden besloten Sony, Philips, Toshiba en Panasonic om samen te werken en een gezamenlijk standaardformaat te

ontwikkelen. Dit leidde in 1995 tot de introductie van de DVD, de '***D**igital **V**ersatile **D**isk*'. Dit nieuwe medium had een opslagcapaciteit van 4,7 GB (single-layer) en 8,5 GB (dual-layer). De beeldkwaliteit was veel beter dan die van VHS dankzij digitale opslag en een zeer ingenieuze en ingewikkelde compressie-techniek, die MPEG werd genoemd.

[98] 2001: Apple introduceert de eerste iPod

Op 23 oktober 2001 introduceerde Apple de eerste iPod met als slogan '*1,000 songs in your pocket*'. Het apparaat had een harde schijf van 5 GB, een mechanisch scrollwiel, een FireWire-aansluiting en had de grootte van een pakje sigaretten. Dankzij het stijlvolle ontwerp werd de iPod een begrip in de muziekwereld. Bij de iPod werden oordopjes geleverd die in bijpassend wit uitgevoerd waren. Volgens marketing-experts was dit een van de '*subtielste marketing-trucs ooit*'. De witte oordopjes vielen erg op en droegen bij aan een hype in de jetset en iedereen die daarbij wilde horen. Met de introductie van de iPod Mini in 2004 werd een jonger publiek aangesproken. In een snel tempo lanceerde Apple steeds nieuwe versies:

- iPod photo (2004)
- iPod shuffle (2005)
- iPod nano (2005)
- iPod video (2005)
- iPod nano 2e gen (2006)
- iPod touch (2007)

In mei 2022 is Apple officieel gestopt met de iPod touch en daarmee kwam er ook een einde aan de iPod als productcategorie.

[99] 2007: Apple introduceert de eerste iPhone

Hoewel de eerste smartphone al in 1992 onder de naam '*Simon Personal Communicator*' door IBM op de markt werd gebracht kan niet worden ontkend dat Apple in 2007 alweer een revolutie veroorzaakte door het op de markt brengen van de eerste iPhone. Dit apparaat was een combinatie van een draagbare telefoon, een personal assistant, een internet-browser (Safari), een fototoestel en een iPad. Het had een display van 8,9 cm met een resolutie van 480 bij 320 pixels. De camera had een resolutie van 2 megapixel. Als besturingssysteem werd een aangepaste versie van Mac OS X gebruikt en er stond 4, 8 of 16 GB intern geheugen ter beschikking.

[100] 2011: D-Wave Systems lanceert de eerte kwantumcomputer

De eerste commercieel beschikbare kwantumcomputer, de D-Wave One met 128 qubits, werd door D-Wave Systems gelanceerd op 11 mei 2011. De zogenaamde '*Rainier*'-processor was opgebouwd uit superconducting flux-qubits, geëtst in een 'Chimera'-topologie en gefabriceerd in het JPL-lab van de NASA. De qubits werden gekoeld tot enkele millikelvin via een dilution refrigerator om kwantumdecoherentie te minimaliseren.
Er zijn echter onderzoekers die beweren dat er weliswaar kwantumeffecten aanwezig zijn in dit apparaat, maar dat de D-Wave One voor de onderzochte testproblemen geen meetbare snelheidswinst liet zien tegenover geoptimaliseerde klassieke algoritmen.



De D-Wave One van D-Wave Systems. (© 2017 Oleg Alexandrov)